การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส

OPERATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS CONNECTED TO ONE-PHASE SUPPLY

โดย

นาย ประยูร อภิศักดิ์ศิริกุล

นาย สมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล

นาย อนุชา นันทบุศยชาติ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

033135

ปีการศึกษา 2536

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส

OPERATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS CONNECTED TO ONE-PHASE SUPPLY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้จัดทำ

นาย ประยูร อภิศักดิ์ศิริกุล 33100204
นาย สมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล 33100391
นาย อนุชา นันทบุศยชาติ 33100481

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ วีรศักดิ์ วงศ์วิวัติ

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2536

เรื่อง การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้จัดทำ

นาย ประยูร	อภิศักดิ์ศิริกุล	33100204
นาย สมชัย	จิรรุ่งโรจน์กุล	33100391
นาย อนุชา	นันทฤฒยชาติ	33100481

อาจารย์ที่ปรึกษา

....

(อาจารย์ วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒ)

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส

OPERATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS CONNECTED TO ONE-PHASE SUPPLY

โดย นาย ประยูร อภิศักดิ์ศิริกุล

นาย สมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล

นาย อนุชา นันทบุศยชาติ

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์วีรศักดิ์ วงศ์วิวัติ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเรื่อง การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด 3-เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1-เฟส ในการวิเคราะห์ผลการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3-เฟสภายใต้สภาวะเงื่อนไขสภาวะไม่สมดุล ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตรจะเป็นหลักเบื้องต้น ในการพิจารณาหาเฟสบาลานซ์เซอร์ที่เหมาะสมในวงจรเฟสสมดุล ซึ่งจะวิเคราะห์กรณีที่ใช้รีแอกแตนซ์ 1 ชุดขนานกับขดลวดสเตเตอร์ จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสกับเฟสบาลานซ์เซอร์ค่าต่างๆเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงภาระต่างๆ โดยต่อกับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1-เฟส และเปรียบเทียบเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อกับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3-เฟส

ABSTRACT

THE PURPOSE OF THIS PROJECT IS ABOUT "OPERATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS CONNECTED TO ONE-PHASE SUPPLY". BY THEORY OF SYMMETRICAL COMPONENTS IS THE ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR OPERATION UNDER UNBALANCED CONDITIONS. THEORY OF SYMMETRICAL COMPONENTS HAS BEEN USED TO CALCULATE REACTANCED IN PHASE BALANCED NETWORKS. ONE OF THE NETWORKS WERE CONNECTED IN PARALLEL IN THE EXPERIMENTAL CIRCUIT IN ORDER TO APPLY SINGLE PHASE SUPPLY VOLTAGE INTO AN INDUCTION MOTOR. RELATIONS BETWEEN PROPERTY OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR AND PHASE BALANCER OF DIFFERENTS LOADS WITH SINGLE PHASE SUPPLY WERE PREPARED WITH THREE PHASE INDUCTION MOTOR CONNECTED TO THREE PHASE SUPPLY.

สารบัญ

บทคัดย่อ

ABSTRACT

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1-1
บทที่ 2	ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส	2-1
	2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส	2-1
	2.2 โครงสร้าง	2-2
	2.3 หลักการทำงาน	2-5
	2.4 ประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส	2-9
	2.5 บทสรุป	2-13
บทที่ 3	ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร	3-1
	3.1 ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร	3-1
	3.2 โอเปอร์เรเตอร์ a	3-3
บทที่ 4	การออกแบบวงจรสมดุลในการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส	4-1
	4.1 บทนำ	4-1
	4.2 วิธีการคำนวณหาค่า reactance	4-1
	- วิธีลองผิดลองถูก (trial and error)	
	- วิธีทำให้ negative sequence มีค่าเท่ากับศูนย์	
	- วิธีการใช้ differentiate เพื่อหาค่า reactance	
บทที่ 5	การทดลอง วิธีการทดลอง และผลการทดลอง	5-1
	5.1 บทนำ	5-1
	5.2 ประเภทและลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส และอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการทดลอง	5-2
	5.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ และพิจารณาเปรียบเทียบการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อระบบแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส และ 1 เฟส	5-3

บทที่ 6 บทวิจารณ์และบทสรุป 6-1

6.1 บทสรุป

6.2 บทวิจารณ์

บทที่ 7 การพิจารณาทางหลักเศรษฐศาสตร์และหลักวิศวกรรมศาสตร์ ในการนำมาใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 1 เฟส และการประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เมื่อต่อกับระบบไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1 เฟส 7-1

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง

บทที่ 1

บทนำ

บทนำ (INTRODUCTION)

ในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้น ในบางครั้งอาจประสบกับปัญหาไม่มีแหล่งจ่ายไฟชนิด 3 เฟสให้ใช้ ตัวอย่างเช่น เครื่องสูบน้ำด้วยไฟฟ้าซึ่งมีมอเตอร์ขับเป็นชนิดที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส หากมีความจำเป็นจะต้องนำเครื่องสูบน้ำเครื่องนี้ไปใช้ในพื้นที่การเกษตรในแถบชนบทที่ห่างไกล ซึ่งมักมีระบบไฟฟ้าเฟสเดียวเป็นส่วนใหญ่ในสภาวะเช่นนี้คงจะเป็นการยากที่จะนำระบบไฟฟ้า 3 เฟสมาใช้ เพราะว่าหากจะต้องนำไฟฟ้า 3 เฟสมาใช้ก็จะต้องติดตั้งระบบไฟฟ้าใหม่ให้กับพื้นที่นั้นๆซึ่งจะเป็นการลงทุนที่ไม่คุ้มค่าในเชิงด้านเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นและจัด ว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์ในการนำมอเตอร์ 3 เฟสมาใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส

วัตถุประสงค์ของโครงงาน เพื่อศึกษาวิธีการทำงานและผลของการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อนำมาใช้กับแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส เพื่อให้สามารถใช้งานตามปกติหรือใกล้เคียงกับภาวะปกติได้และเปรียบเทียบกับการทำงานในภาวะปกติ โดยที่วิธีการลดผลของกรณีภาวะไม่สมดุลเมื่อจ่ายแหล่งจ่ายไฟเพียง 1 เฟสโดยการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์เข้าไป เช่น ต่อตัว capacitor ขนานขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยจะเป็นตัวปรับความสมดุลของเฟส และจะพิจารณาถึงผลของเฟสบาลานซ์เซอร์ที่ใช้งาน ที่มีต่อสมรรถนะของมอเตอร์ กล่าวคือจะพิจารณากรณีที่ค่าของเฟสบาลานซ์เซอร์ ซึ่งได้จากการคำนวณ ทำให้การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพิจารณากรณีอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งกรณีอื่นจะต้องทำการคำนวณเพื่อที่จะได้เงื่อนไขในการเลือกค่าของเฟสบาลานซ์เซอร์ ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของมอเตอร์มากที่สุด โดยจะทำการวิเคราะห์ผลของการทำงานกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า

นอกจากการศึกษาและพิจารณาถึงผลของการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟสแล้ว ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบราคาของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส และมอเตอร์ชนิด 1 เฟส ซึ่งการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสจะต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ที่ใช้เป็นเฟสบาลานซ์เซอร์ เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในการทำงาน โดยผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบเชิงเศรษฐกิจ ระหว่างการใช้งาน

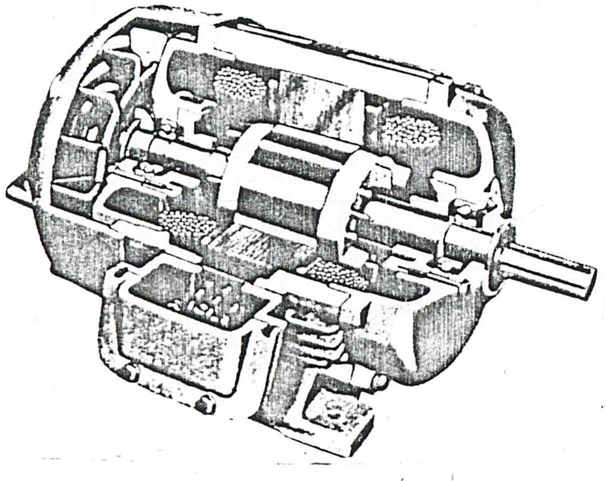
ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะปกติ และการประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส ให้มีประสิทธิภาพตามความต้องการในการใช้งาน ซึ่งตามทฤษฎีทางวิศวกรรมแล้ว ลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส คือ มีโครงสร้างที่ง่าย สะดวกในการใช้งาน แข็งแรงและทนทาน ไม่ค่อยมีปัญหา การบำรุงรักษาและซ่อมแซมทำได้ง่าย มีราคาถูก ช่วงพิกัดกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้กว้างมากจากไม่กี่วัตต์ ไปจนถึงหลายพันกิโลวัตต์ และค่าศักดาไฟฟ้าที่ใช้สำหรับมอเตอร์จากสิบสิบโวลต์ไปจนถึงเป็นพันพันโวลต์ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีข้อได้เปรียบจากแหล่งจ่ายไฟไปสู่มอเตอร์ สามารถใช้ได้กับไฟในบ้าน แต่มีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสกล่าวคือ ต้องการวงจรสตาร์ทเป็นพิเศษ สมบัติต่างๆด้อยกว่า เช่น ประสิทธิภาพ เพาเวอร์แฟกเตอร์ ในขนาดเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะมีราคาสูงกว่า โดยที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกินกระแสขณะสตาร์ทสูง ดังนั้นจะไม่มีมอเตอร์ขนาดใหญ่ในท้องตลาด (ขนาดถึงประมาณ 1 กิโลโวลต์เป็นสูงสุด) ดังนั้นในการนำมอเตอร์ไปใช้งานจะต้องทำการพิจารณาให้ละเอียดถี่ถ้วน ว่าจะต้องการนำไปใช้งานในลักษณะใด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามต้องการ

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส (THREE PHASE INDUCTION MOTOR)

มอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (INDUCTION MOTOR)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มีทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำและซิงโครนัสมอเตอร์ มีใช้งานอย่างแพร่หลายตั้งแต่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จนถึงโรงงานขนาดเล็ก แม้แต่ในบ้านพักอาศัยก็มีใช้กัน ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะของเครื่องอำนวยความสะดวกทั้งที่จำเป็นและฟุ่มเฟือยในรูปแบบต่างๆกันมากมายตั้งแต่ขนาดเล็กๆไปจนถึงขนาดใหญ่ๆ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับคือเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ พลังงานไฟฟ้าไม่ได้นำเข้าสู่โรเตอร์ของมอเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำ การหมุนของมอเตอร์นี้จะเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์ ดังนั้นจึงเรียกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับว่า อินดั๊กชั่นมอเตอร์



รูปที่ 2.1.1 แสดงลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

ปกติเครื่องกลอินดั๊กชั่นเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิด แต่ถ้านำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดจะมีข้อเสียมากจึงไม่ค่อยนิยมใช้กัน ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงเครื่องกลอินดั๊กชั่นจึงมักหมายถึงมอเตอร์อินดั๊กชั่นหรือมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เพราะ

มอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือ ความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซนต์ แต่มีข้อเสียคือ

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ power facter ต่ำและล้าหลัง
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุน มักจะเป็น 5 เท่า หรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าขณะขับโหลดเต็มที่ (กระแสไฟฟ้าที่พิกัด)

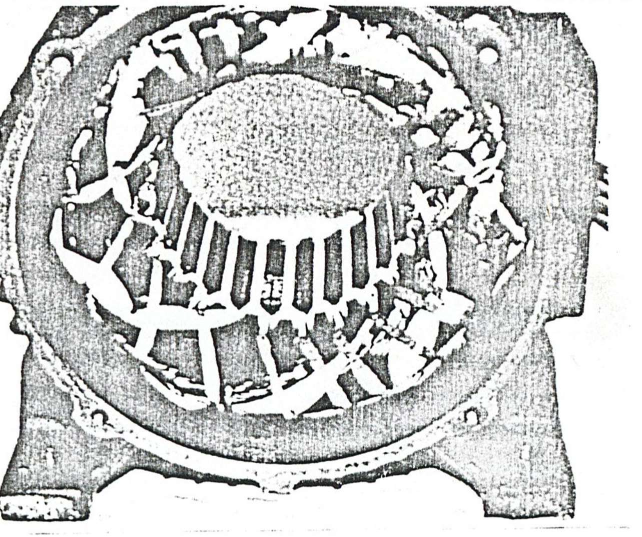
มอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นแบบเฟสเดียวหรือหลายเฟสก็ได้โดยปกติแล้วมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำชนิดหลายเฟส (poly phase induction motor) มักจะหมายความถึงแบบที่เป็น 3 เฟส

2.2 โครงสร้าง (Construction)

มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำตัวหนึ่ง ๆ นั้น ต่างก็ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ 2 ส่วนคือ

1. ส่วนอยู่กับที่ (stator)
2. ส่วนที่หมุนหรือเคลื่อนที่ (rotor)

1. ส่วนอยู่กับที่ มีขดลวดพันอยู่ในช่อง(slot) ภายในของตัวที่อยู่กับที่โดยรอบ การพันนี้อาจเป็นแบบเฟสเดียวหรือหลายเฟสก็ได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ 3 เฟส การพันแบบ 3 เฟสนี้จะต้องมีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้นภายในตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.2.1 แสดงส่วนอยู่กับที่ (stator) ของมอเตอร์

2. <u>ส่วนที่หมุน</u> ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

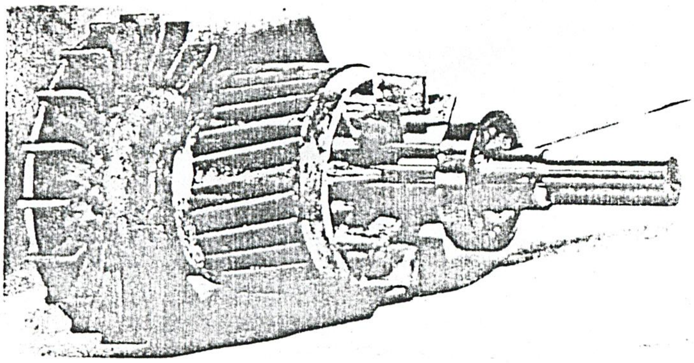
1. แบบที่มีตัวหมุนคล้ายกรงกระรอก (squirrel cage rotor)

เป็นแบบที่ไม่ต้องการใช้วงแหวน (slip ring) ติดอยู่กับตัวหมุนหรือเรียกว่า " non slip ring machines " ประกอบด้วยตัวนำที่ฝังอยู่ภายในตัวหมุนไปรอบๆ ตามผิวทรงกระบอกกลม โดยที่ตัวนำทั้งชุดนี้ต่างก็ถูกลัดวงจรที่ปลายทั้งสองด้านของตัวหมุนด้วยตัวนำที่เป็นรูปวงแหวน ซึ่งอาจจะเป็นทองแดงหรือ ทองเหลืองก็ได้ จำนวนขั้วของแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวหมุนนี้ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดขึ้นที่ตัวอยู่กับที่เสมอ ตัวหมุนแบบนี้จะมีราคาถูกและแข็งแรงแต่ว่าแรงบิดเริ่มแรก (stating torque) ต่ำ ตัวหมุนแบบนี้ส่วนใหญ่แล้วจะมีตัวนำที่ฝังลงไปในช่องที่เฉียง (skew slots) กับแกน ซึ่งช่วยทำให้มอเตอร์วิ่งได้เรียบยิ่งขึ้นโดยการลด magnetic hum

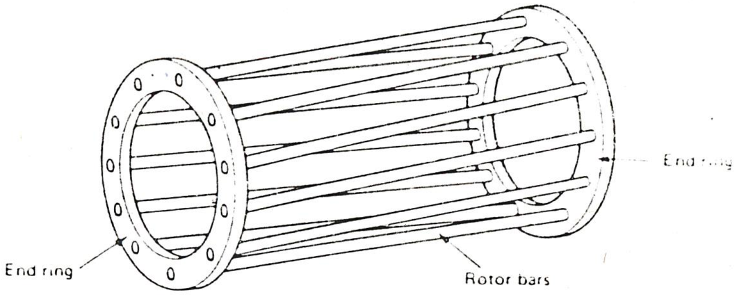
ตัวหมุนแบบกรงกระรอกทั้ง 2 แบบ คือ แบบที่ฝังตัวนำลงไปในแกนเหล็กแผ่นอาบน้ำยารูปทรงกระบอกแบบตรง ๆ ตามความยาวของตัวหมุน และตัวหมุนที่ฝังตัวนำลงไปในแกนเหล็กแผ่นอาบน้ำยารูปทรงกระบอกเช่นเดียวกัน แต่เป็นแบบเฉียงนี้จะใช้ตัวนำที่เป็นแท่งหนาซึ่งไม่ใช่เส้นลวดเหมือนแบบตัวหมุนชนิดที่ใช้พันด้วยขดลวด (wound rotor) ซึ่งจะกล่าวต่อไป ตัวนำดังกล่าวนั้น นอกจากจะเป็นแท่งทองแดงหรืออะลูมิเนียมดังที่กล่าวแล้วในตอนต้นนั้นก็อาจเป็นโลหะผสมอื่น ๆ ก็ได้ ตัวนำแต่ละแท่งนั้นจะฝังลงไปในแต่ละร่องของแกนเหล็กที่ตัวหมุนมากกว่าที่จะสอดแท่งตัวนำจากปลายหนึ่งไปยังอีกปลายหนึ่งเมื่อร่องนั้นเป็นแบบกึ่งปิดกึ่งเปิด semi-closed & semi-open slot

<u>ข้อควรสังเกต</u>

จากตัวหมุนแบบกรงกระรอกนี้ก็คือ ตัวนำของตัวหมุนทุก ๆ ตัว โดนลัดวงจรไว้ในตัวเองอย่างถาวร ฉะนั้นจึงเป็นไปไม่ได้ ที่จะนำความต้านทานภายนอกมาต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อใช้ในการช่วยทำให้มอเตอร์เริ่มหมุน



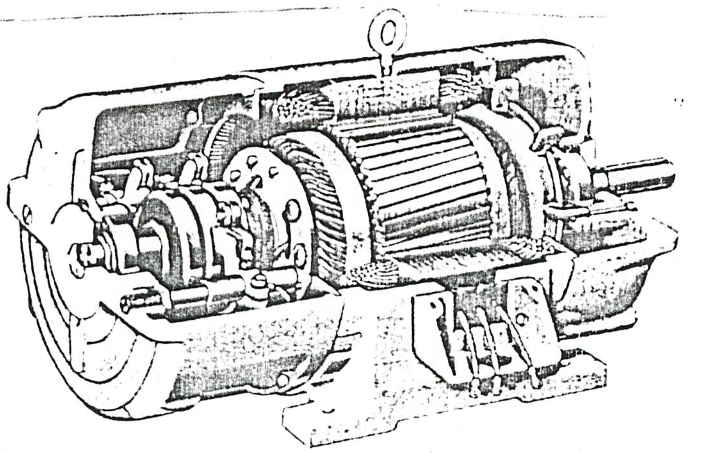
รูปที่ 2.2.2



รูปที่ 2.2.2 (ต่อ) แสดงตัวหมุนกรงกระรอก (squirrel cage rotor)

2. แบบที่ตัวหมุนมีขดลวดพันอยู่รอบๆ (wound rotor)

การพันที่ตัวหมุนนี้อาจเป็น 2 เฟส หรือ 3 เฟสก็ได้ โดยที่ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวหมุนนี้ จะต้องมีจำนวนขั้วที่เท่ากับที่มีอยู่บนตัวอยู่กับที่ (stator) แบบนี้ต้องใช้วงแหวนติดไว้ที่ตัวหมุน เพื่อนำปลายของขดลวดที่พันอยู่บนตัวหมุนต่อออกมายังวงจรภายนอก หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "slip ring machines "การพันขดลวดบนตัวหมุนนี้ มีลักษณะการพันเช่นเดียวกับที่บนตัวอยู่กับที่ โดยที่จะต้องพันให้มีจำนวนขั้วแม่เหล็กบนตัวหมุนเท่ากับจำนวนขั้วที่มีอยู่บนตัวอยู่กับที่ในขณะที่มันยังทำงานอยู่ จำนวนเฟสบนตัวหมุนนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องเท่ากับจำนวนเฟสที่อยู่บนตัวอยู่กับที่ แต่เนื่องจากว่า มอเตอร์ชนิดนี้จะหมุนได้ก็ต่อเมื่อวงจรทางตัวหมุนต่อวงจรครบในตัวหรือขดลวดที่พันบนตัวหมุนโดนลัดวงจร ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงแหวนอื่นอีก 3 หรือ 4 วง เพื่อต่อตัวนำไปยังวงจรภายนอกเพื่อลัดวงจรหรือต่อกับความต้านทานเพื่อใช้ในการเดินเครื่องด้วย



รูปที่ 2.2.3 แสดงตัวหมุนที่มีขดพันอยู่บนรอบ ๆ (wound rotor)

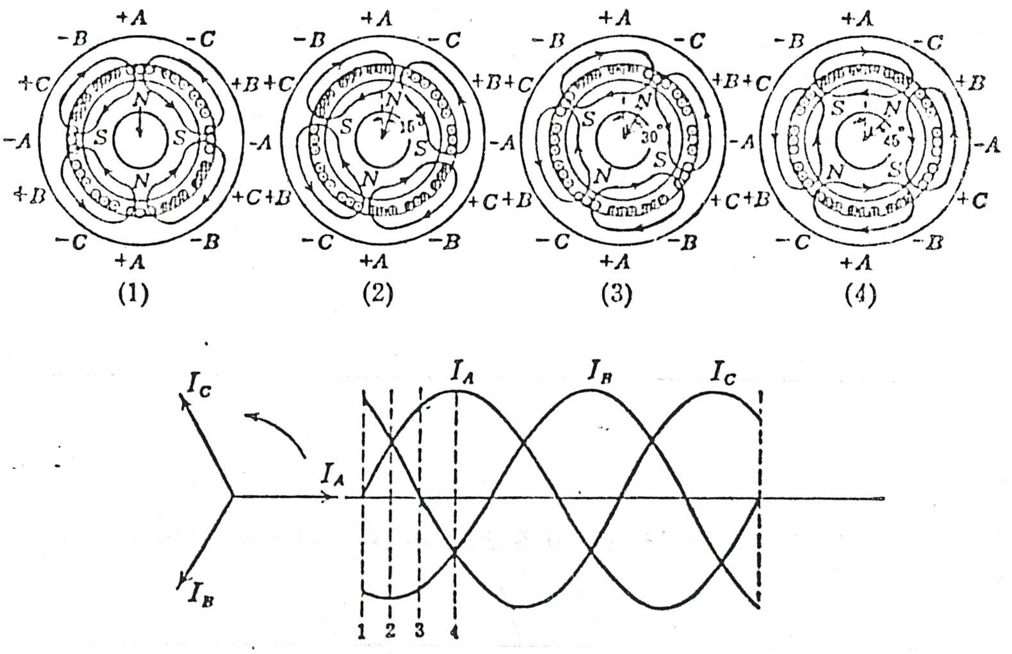
ทั้งสองแบบนี้ต่างก็มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน ส่วนที่แตกต่างกันก็เพียงแต่โครงสร้างของส่วนที่สอง(secondary element) ซึ่งก็คือตัวหมุนหรือ rotor นั่นเองสำหรับส่วนที่อยู่กับที่คือ stator element นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดกระแสไฟสลับ และนับเป็นส่วนที่หนึ่งของเครื่อง (primary element)

2.3 หลักการทำงาน (Principle of operation)

2.3.1 สนามแม่เหล็กหมุน (Revolving Field หรือ Rotating Field)

การพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

- **สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ชนิด 3 เฟส** มอเตอร์ชนิด 3 เฟส คือมอเตอร์ที่มีจำนวนขดลวดภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้วรวมกันสามชุด ซึ่งอาจจะเรียกว่า ชุดที่ 1 ชุดที่ 2 ชุดที่ 3 หรือเรียกว่า เฟส 1 เฟส 2 เฟส 3 หรือเฟส A เฟส B เฟส C เป็นต้น พิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์สามเฟสได้ดังรูป 2.3.1 ซึ่งแสดงให้เห็นมอเตอร์สามเฟสชนิด 4 โพล ซึ่งแต่ละโพลก็จะมีขดลวด 3 ชุดคือเฟส A เฟส B เฟส C ในรูปที่ 2.3.1 ที่เป็นกระแสไฟจากเครื่องกำเนิดสามเฟสที่จะป้อนให้กับมอเตอร์คือกระแส I_A , I_B และ I_C ซึ่งกระแสแต่ละส่วนจะทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้า



รูปที่ 2.3.1 แสดงลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์สามเฟส

เริ่มพิจารณา ณ.จุดที่ 1 ในรูปที่ 2.3.1 กระแส I_A มีค่าเป็นศูนย์ กระแส I_B เป็นลบ กระแส I_C เป็นบวก ดังนั้นกระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B และไหลออกทางด้าน +B กระแส I_C จะไหลเข้าขดลวดเฟส C ที่ด้าน +C และไหลออกทางด้าน -C จะไม่มีกระแสไฟไหลเข้าขดลวดเฟส A เมื่อใช้กฎมือขวา หาทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแล้ว จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส B ที่ด้าน +B และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส C ที่ด้าน -C ที่อยู่ใกล้กันจะมีทิศทางเสริมกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส C ที่ด้าน +C ที่อยู่ใกล้กันจะมีทิศทางเสริมกัน และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่จากขั้ว N ไปสู่ขั้ว S จะได้ขั้วแม่เหล็ก N ในแนวดิ่งและได้ขั้วแม่เหล็ก Sในแนวนอน

พิจารณาจุดที่ 2 กระแส I_A และ I_C เป็นบวกและมีค่าเท่ากัน กระแส I_B เป็นลบสูงสุด กระแส I_A จะไหลเข้าขดลวดเฟส A ที่ด้าน +A และไหลออกที่ด้าน -A กระแส I_C จะไหลเข้าขดลวดเฟส C ที่ด้าน +C และไหลออกที่ด้าน -C กระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B และไหลออกที่ด้าน +B เมื่อใช้กฎมือขวาพิจารณาหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพบว่า ขดลวดเฟส A ที่ด้าน -A ขดลวดเฟส B ที่ด้าน +B ขดลวดเฟส C ที่ด้าน -C ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมามีทิศทางเสริมกันและขดลวดเฟส A ที่ด้าน +A ขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B ขดลวดเฟส C ที่ด้าน +C ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ทำให้ขั้วแม่เหล็ก N ในจุดที่ 1 ซึ่งอยู่ในแนวดิ่งเริ่มเคลื่อนที่ไปทางขวามือห่างจากแนวดิ่งเล็กน้อย และขั้วแม่เหล็ก S ในจุดที่ 1 ซึ่งอยู่ในแนวนอนเริ่มเคลื่อนที่ออกห่างจากแนวนอนเล็กน้อยด้วย

พิจารณาจุดที่ 3 กระแส I_A เป็นบวก กระแส I_B เป็นลบ กระแส I_C เป็นศูนย์ กระแส I_A จะไหลเข้าขดลวดเฟส A ที่ด้าน +A และไหลออกที่ด้าน -A กระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B และไหลออกที่ด้าน +B ส่วนขดลวดเฟส C จะไม่มีกระแสไฟไหลเข้า เมื่อใช้กฎมือขวาพิจารณาหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพบว่า ขดลวดเฟส A ที่ด้าน -A ขดลวดเฟสB ที่ด้าน +B ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกันและขดลวดเฟส A ที่ด้าน +A ขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ทำให้ขั้วแม่เหล็ก N เคลื่อนที่ห่างจากแนวดิ่งมากขึ้น และขั้วแม่เหล็ก S ก็จะเคลื่อนที่ออกห่างจากแนวนอนมากขึ้นเช่นกัน

พิจารณาจุดที่ 4 กระแส I_A เป็นบวกสูงสุด กระแส I_B และ I_C เป็นลบ และมีค่าเท่ากัน กระแส I_A จะไหลเข้าขดลวดเฟส A ที่ด้าน +A และไหลออกที่ด้าน -A กระแส I_C จะไหลเข้าขดลวดเฟส C ที่ด้าน -C และไหลออกที่ด้าน +C กระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B และไหลออกที่ด้าน +B เมื่อใช้กฎมือขวาพิจารณาหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพบว่า ขดลวดเฟส A ที่ด้าน -A ขดลวดเฟส B ที่ด้าน +B ขดลวดเฟส C ที่ด้าน +C ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมามีทิศทางเสริมกันและขดลวดเฟส A ที่ด้าน +A ขดลวดเฟส B ที่ด้าน -B ขดลวดเฟส C ที่ด้าน -C ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ทำให้ขั้วแม่เหล็ก N เคลื่อนที่ห่างจากแนวดิ่งมากยิ่งขึ้น และขั้วแม่เหล็ก S ก็จะเคลื่อนที่ออกห่างจากแนวนอนมากยิ่งขึ้น และมุมการเคลื่อนที่ของขั้ว S ห่างจากแนวนอนนี้จะเท่ากับมุมการเคลื่อนที่ของขั้ว N ห่างจากแนวดิ่งด้วย

จากการที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดที่พันอยู่กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์แบบนี้เรียกว่า สนามแม่เหล็กหมุน (REVOLVING FIELD , ROTATING FIELD)

- **สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ชนิด 1 เฟส** สำหรับมอเตอร์หนึ่งเฟสในหนึ่งเฟสในหนึ่งขั้ว จะมีขดลวดเพียง 1 ชุดเท่านั้น เมื่อมีขดลวดเพียงชุดเดียว สนามแม่เหล็กแทนที่จะหมุนเช่นเดียวกับมอเตอร์ 3 เฟส แต่จะกลับขั้วจากขั้วเหนือเป็นขั้วใต้ และกลับจากขั้วใต้เป็นขั้วเหนือ กลับไปกลับมาเท่านั้น จะทำให้โรเตอร์สั่นและไม่หมุนด้วยโดยที่วิธีการทำให้มอเตอร์หมุนนั้น ก็กระทำโดยทำให้สนามแม่เหล็กหมุนหมุนก่อน

2.3.2 <u>ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำและค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ</u>

- ความเร็วซิงโครนัส เมื่อทำการป้อนไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดมอเตอร์ โดยที่ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะแปรผันโดยตรงกับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์แต่จะแปรผันเป็นส่วนกลับกับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ตัวนั้น ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (SYNCHRONOUS SPEED, N_s) โดย

$$N_s = 120f/P$$

เมื่อ N_s = ความเร็วซิงโครนัส-รอบต่อนาที

f = ความถี่ของระบบไฟฟ้า- ไซเกิลต่อวินาที

p = จำนวนขั้วแม่เหล็ก-โพล(ขั้ว)

- ความเร็วโรเตอร์และสลิป (slip)ในความเป็นจริงแล้ว โรเตอร์ของมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสแล้ว จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ จะไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำและจะไม่เกิดแรงบิดขึ้นมา คือโรเตอร์จะไม่หมุนนั่นเอง เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วของโรเตอร์นี้เรียกว่า สลิป (slip) หรือความเร็วสลิป (slip speed)

ดังนั้น slip speed = $N_s - N$ รอบต่อนาที

เมื่อแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซนต์ ได้ดังนี้

$$\text{slip speed}, S = (N_s - N) / N_s$$

$$\% S = [(N_s - N) / N_s] * 100\%$$

เมื่อ N_s = ความเร็วซิงโครนัส (รอบต่อนาที)

N = ความเร็วโรเตอร์ (รอบต่อนาที)

- **แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและความถี่โรเตอร์** ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น คือไม่เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำและก็จะไม่เกิดความถี่ขึ้นที่โรเตอร์ แต่ถ้าโรเตอร์อยู่กับที่จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ และเกิดความถี่ขึ้นที่โรเตอร์ และมีค่าเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ณ.จุดนี้ มอเตอร์จะมีสลิป = 1 ถ้ามอเตอร์มีสลิป = 0.5 ความถี่โรเตอร์จะมีค่าครึ่งหนึ่งของความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และถ้ามอเตอร์มีสลิป = 0.25 ความถี่โรเตอร์จะมีค่าเพียง 25 เปอร์เซนต์ของความถี่ป้อนให้กับมอเตอร์ ความถี่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับผลต่างของความเร็วซิงโครนัส และความเร็วโรเตอร์ ดังนี้

$$f_r = sf$$

เมื่อ f_r = ความถี่โรเตอร์ (ไซเคิลต่อวินาที)

ดังนั้นความถี่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าสลิปคูณกับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำไม่มีวงจรไฟฟ้าต่อเชื่อมกันระหว่างตัวอยู่กับที่กับตัวหมุนกระ

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แสที่เกิดขึ้นในตัวหมุนที่ไหลอยู่ภายในแท่งตัวนำที่ฝังอยู่รอบๆตัวหมุน เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวหมุน แรงเคลื่อนไฟที่เกิดขึ้นเกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนที่มาจากตัวอยู่กับที่ ซึ่งได้รับกำลังไฟสลับมาจากภายนอก สนามแม่เหล็กลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนตัวอยู่กับที่ จะหมุนคล้ายกับการหมุนของแม่เหล็กถาวร ด้วยความเร็วเท่ากับ synchronous ซึ่งทำให้เกิดการตัดของสนามแม่เหล็ก หรือมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กขึ้นบนตัวนำที่อยู่บนตัวหมุน ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลง เมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านตัวนำบนตัวหมุนจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟขึ้นที่ตัวนำ ในตัวหมุนแรงเคลื่อนไฟนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลในตัวนำขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่ตัวหมุนในทิศทางที่หมุนไปทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน

2.4 ประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Motor Classification)

ตามมาตรฐานของ NEC (National Electrical Code) และ NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ได้จำแนกมอเตอร์เหนี่ยวนำออกเป็น 6 ระดับ หรือ 6 class ด้วยกัน คือ class A,B,C,D,E และ F มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ที่โรเตอร์มีสล๊อทตื้น จัดเป็นมอเตอร์ขั้นพื้นฐานคือเป็นมอเตอร์ class A นั่นก็คือ ข้อมูลของมอเตอร์ class A นี้ถือเป็นข้อมูลอ้างอิงและมอเตอร์แต่ละ class มีคุณสมบัติดังนี้

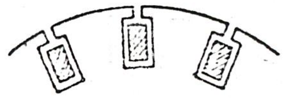
class A	มีแรงบิดสตาร์ทปกติ กระแสสตาร์ทปกติ	และมีสลิปปกติ
class B	มีแรงบิดสตาร์ทปกติ กระแสสตาร์ทต่ำ	และมีสลิปปกติ
class C	มีแรงบิดสตาร์ทสูง กระแสสตาร์ทต่ำ	และมีสลิปปกติ
class D	มีแรงบิดสตาร์ทสูง กระแสสตาร์ทต่ำ	และมีสลิปสูง
class E	มีแรงบิดสตาร์ทต่ำ กระแสสตาร์ทปกติ	และมีสลิปต่ำ
class F	มีแรงบิดสตาร์ทต่ำ กระแสสตาร์ทต่ำ	และมีสลิปปกติ

2.4.1 มอเตอร์ class A เป็นมอเตอร์ที่มีใช้แพร่หลาย ขดลวดสไควเรลเกจจะมีความต้านทานต่ำ และรีแอคแท้นซ์ต่ำเช่นกัน กระแสสตาร์ท (lock rotor current) ที่แรงดันปกติ (แรงดันเต็มพิกัด) จะมีค่าประมาณ 5-7 เท่าของกระแสเต็มพิกัด สำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กและมีจำนวนโพลน้อย แรงบิดสตาร์ทที่แรงดันเต็มพิกัดจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด สำหรับมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนโพลมาก แรงบิดสตาร์ท

033135

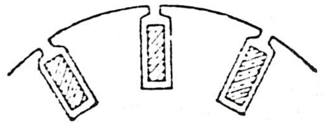
จะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด สลิปเต็มพิกัดจะมีค่าน้อยกว่า 5 % ลักษณะของสล๊อทของโรเตอร์ จะตื้น ดังรูป ตัวนำในสล๊อทจะอยู่ใกล้ผิวหน้าของแกนโรเตอร์ ทั้งนี้เพื่อลดรีแอคแท้นซ์ ถ้ามอเตอร์มีแรงม้าสูงกว่า 7 1/2 แรงม้า จะต้องลดแรงดันสตาร์ทลง มอเตอร์ class A จะอยู่ในรหัส (code letter) F-R

มอเตอร์ class A มักจะนำไปใช้กับพัดลม เครื่องเป่าลม ปั๊มลม ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจักรกล ปั๊ม และงานขับที่ไม่มีการสตาร์ทบ่อยๆ



รูปที่ 2.4.1 ลักษณะสล็อทโรเตอร์ของมอเตอร์ class A

2.4.2 <u>มอเตอร์ class B</u> เป็นมอเตอร์แบบที่ สามารถสตาร์ทที่โหลดเต็มพิกัดได้ โดยจะมีแรงบิดสตาร์ทปกติ คือประมาณ 1.5 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด แต่กระแสสตาร์ทกลับลดลงคือประมาณ 4.5-5 เท่าของกระแสเต็มพิกัด ลักษณะสล๊อท ดังรูป สล๊อทจะลึกและแคบทั้งนี้เพื่อให้มีค่ารีแอคแท้นซ์ในช่วงสตาร์ทสูง โรงงานผลิตมอเตอร์มักจะผลิตมอเตอร์ class B ที่มีขนาดมากกว่า 5 แรงม้า และมอเตอร์ class B จะอยู่ในรหัส (code letter) B-E

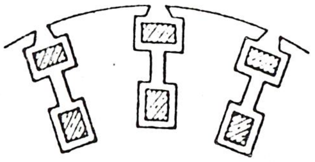


รูปที่ 2.4.2 ลักษณะสล็อทโรเตอร์ของมอเตอร์ class B

2.4.3 <u>มอเตอร์ class C</u> เป็นมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแบบสไควเรลเกจ 2 ชั้น ดังรูป ลักษณะเช่นนี้ จะทำให้แรงบิดสตาร์ทสูงและกระแสสตาร์ทต่ำ โดยที่กระแสสตาร์ทและสลิปจะมีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์ class B แรงบิดสตาร์ทจะมีค่าประมาณ 2.25 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด มอเตอร์ class A และ B ถ้าลดแรงดันสตาร์ทลงแรงบิดสตาร์ทจะไม่สูงพอที่จะขับโหลดได้ แต่สำหรับมอเตอร์ class C มีแรงบิดสตาร์ทและแรงบิดขณะทำงานสูงด้วย และกระแสสตาร์ทต่ำ ถ้าจำเป็นจะลดแรงดันสตาร์ทลงก็ได้ ก็ยังสามารถขับโหลดได้ มอเตอร์ class C จัดอยู่ในรหัส B-E

มอเตอร์ class C จะนำไปใช้กับเครื่องกด (crusher) เครื่องผสม(mixer)

ปั๊มลม เครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ (refrigerating machines) เครื่องทอผ้า เครื่องจักรงานไม้ ปั๊ม เครื่องบรรทุก



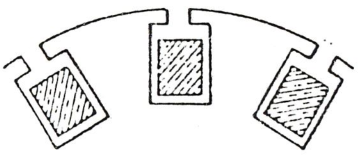
รูปที่ 2.4.3 ลักษณะสล็อทโรเตอร์ของมอเตอร์ class C

2.4.4 <u>มอเตอร์ class D</u> เป็นมอเตอร์ที่ออกแบบให้มี ความต้านทานของขดลวดสไควเรลเกจสูงเพื่อให้แรงบิดสตาร์ทสูงและให้รีแอคแต้นซ์สูงในช่วงสตาร์ทเพื่อลดกระแสสตาร์ทลง กระแสสตาร์ทของมอเตอร์ class D นี้จะมีค่าเท่ากับ มอเตอร์ class C สลิปเต็มพิกัดมีค่า 5-20 % ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโหลดส่วนแรงบิดสตาร์ทมีค่าประมาณ 2.75 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัด ลักษณะสล็อทของโรเตอร์ดังรูป จะมีลักษณะเล็ก ดังนั้นแท่งตัวนำจึงเล็กและบาง ความต้านทานจึงสูง และกระแสสตาร์ทจะต่ำ

รูปที่ 2.4.4 ลักษณะสล็อทโรเตอร์ของมอเตอร์ class D

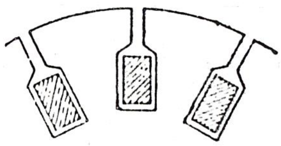
มอเตอร์ class D นี้จะนำไปใช้กับงานที่ต้องการแรงบิดสตาร์ทสูง เช่น เครื่องเจาะ (punch press) เครื่องตัด(shear) เครื่องประทับตรา(stamping machine)ปั้นจั่น (hoist) อุปกรณ์เครื่องหล่อโลหะ(foundry equipment) เครื่องซักฟอก (laundry machine) อุปกรณ์ลอกสายโลหะ(metal drawing)

2.4.5 <u>มอเตอร์ class E</u> เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดสตาร์ทต่ำ กระแสสตาร์ทมีค่าปกติเหมือนกับมอเตอร์ class A แต่สลิปเมื่อทำงานเต็มพิกัดจะมีค่าต่ำ ลักษณะสล็อทดังรูป จะมีลักษณะสล็อทโต แท่งตัวนำใหญ่ ถ้ามีขนาดแรงม้าสูงกว่า 7.5 แรงม้า กระแสสตาร์ทจะสูง จึงต้องใช้วิธีการสตาร์ทด้วยการต่อความต้านทานร่วมกับขดลวดสเตเตอร์ที่เรียกว่า resistance-starter



รูปที่ 2.4.5 ลักษณะสล็อทโรเตอร์ของมอเตอร์ class E

2.4.6 <u>มอเตอร์ class F</u> เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดสตาร์ทต่ำ กระแสสตาร์ทต่ำ แต่สามารถที่จะสตาร์ทด้วยแรงดันเต็มพิกัดได้ การที่กระแสสตาร์ทต่ำเนื่องจากการออกแบบให้โรเตอร์ มีรีแอคแท้นซ์ขณะสตาร์ทสูง ลักษณะสล็อทของโรเตอร์ดังรูปคือสล็อทจะอยู่ลึก กระแสสตาร์ทและสลิปเต็มพิกัดจะเหมือนกับมอเตอร์ class B และ C สำหรับแรงบิดสตาร์ทจะต่ำคือมีค่าประมาณ 1.25 เท่าของแรงบิดเต็มพิกัดเท่านั้นต่ำกว่ามอเตอร์ class A และ B เสียอีก



รูปที่ 2.4.6 ลักษณะสล็อทโรเตอร์ของมอเตอร์ class F

รหัส	KVA ต่อ Hp เมื่อล็อคโรเตอร์
A	0 ถึง 3.14
B	3.15 ถึง 3.54
C	3.55 ถึง 3.99
D	4.0 ถึง 4.49
E	4.5 ถึง 4.99
F	5.0 ถึง 5.59
G	5.6 ถึง 6.29
H	6.3 ถึง 7.09
J	7.1 ถึง 7.99
K	8.0 ถึง 8.99
L	9.0 ถึง 9.99
M	10.0 ถึง 11.19
N	11.2 ถึง 12.49
P	12.5 ถึง 13.99
R	14.0 และมากกว่า

ตารางแสดงค่ากิโลวัตต์ (KVA) ต่อแรงม้า (Hp) ของมอเตอร์ตามรหัสต่างๆ

2.5 บทสรุป

เนื่องจากมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ไม่ถึงหนึ่งแรงม้าจนกระทั่งเป็นพันแรงม้า ที่ใช้กันในวงการอุตสาหกรรม ใช้ได้ทั้งไฟสูงและต่ำมีทั้งแบบเฟสเดียวและสามเฟส จึงสรุปเป็นข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

ข้อดี

1. แข็งแรงทนทาน ใช้ได้สะดวก
2. ราคาถูก การทำงานเชื่อถือได้ ความเร็วค่อนข้างคงที่พอใช้

3. ไม่ต้องใช้แปรงถ่านกับซี่ทองแดง (commutator) ซึ่งทำให้ลดการบำรุงรักษาลงได้มาก
4. การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานน้อย มีประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังดีพอ
5. วิธีการทำให้มอเตอร์หมุนทำได้ง่าย สะดวกและราคาถูก

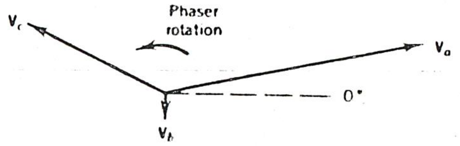
ข้อเสีย

1. ยากต่อการควบคุมหรือปรับความเร็วตามที่ต้องการ
2. การควบคุมความเร็ว (speed reguration) ต่ำกว่ามอเตอร์ไฟตรงแบบขนาน (D.C. shunt motor)
3. แรงบิดเริ่มแรก ต่ำกว่ามอเตอร์ไฟกระแสตรง

บทที่ 3
ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร

3.1 ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร (SYMMETRICAL COMPONENT THEORY)

ในสภาวะปกติ แรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสอยู่ในสมดุล แต่ถ้าเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าขึ้น เช่น โหลดไม่สมดุล, เกิด Fault แบบต่างๆ เช่น single line to ground fault , double line to ground fault , three phase fault เป็นต้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีสภาพไม่สมดุล ซึ่งสมมติให้แรงดันไฟฟ้าในสภาพผิดปกติเป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Three Unbalanced Phasors

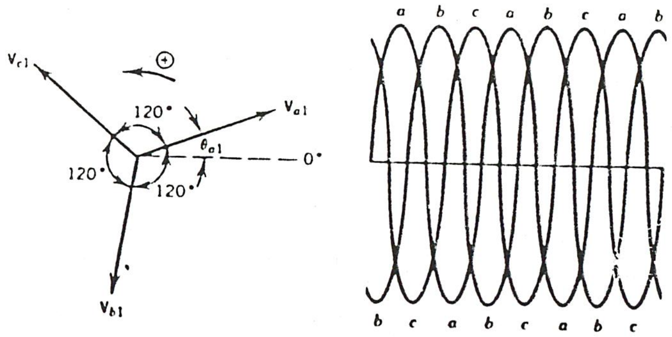
โดยสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าจากเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลกัน (ดังรูปที่ 3.1)โดยนำ phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่สมมาตรจำนวน 3 ชุด ซึ่งเรียกว่า องค์ประกอบที่สมมาตร (symmetrical component) มาบวกกัน

SYMMETRICAL COMPONENT

หมายถึง phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่สมมาตรกันจำนวน 3 ระบบ ซึ่งประกอบด้วย

1. ระบบที่มีการเรียงลำดับเป็นบวก (Positive Sequence System)

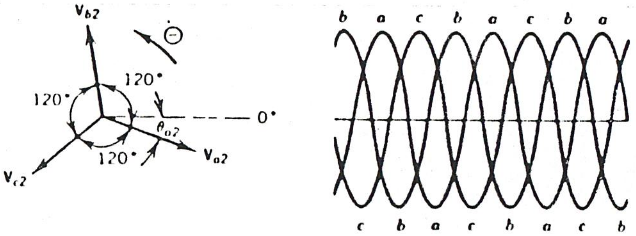
เป็น phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าจำนวน 3 phasorที่มีการเรียงลำดับเฟสเหมือนกับการเรียงลำดับเฟสของระบบไม่สมดุลดั้งเดิมที่ใช้ในการพิจารณา (เช่นรูปที่ 3.1) และวางตัวห่างกัน 120 องศา ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Positive Sequence Components

2. <u>ระบบที่มีการเรียงลำดับเป็นลบ</u> (Negative Sequence System)

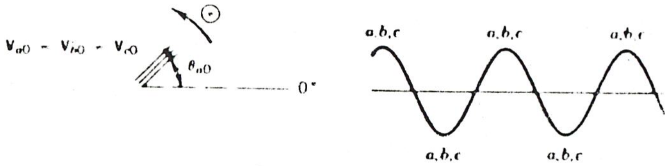
เป็น phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าจำนวน 3 phasor ที่มีการเรียงลำดับเฟสตรงข้ามกับการเรียงลำดับเฟสของระบบไม่สมดุลดั้งเดิมที่ใช้ในการพิจารณา และวางตัวห่างกัน 120 องศา ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Negative Sequence Components

3. <u>ระบบที่มีการเรียงลำดับเป็นศูนย์</u> (Zero Sequence System)

เป็น phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าจำนวน 3 phasor ที่มีมุม inphase กัน ดังรูปที่ 3.4

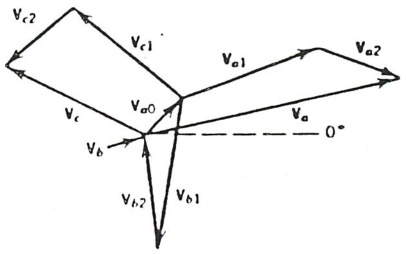


รูปที่ 3.4 Zero Sequence Components

<u>หมายเหตุ</u> ตัว subscript 1,2,3 แสดงระบบที่มีการเรียงลำดับเป็นบวก ,ลบ, ศูนย์ ตามลำดับ

การหาค่าแรงดันไฟฟ้า phasor ที่ไม่สมดุล สามารถหาได้โดยการนำ phasor ของแรงดันไฟฟ้าที่สมมาตรกันทั้ง 3 ระบบ ดังรูปที่ 3.2,3.3,3.4 มาบวกกัน

ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Graphical addition of the components to obtain three unbalanced components

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (3.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (3.3)$$

จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า phasor ที่ไม่สมดุลในแต่ละเฟส ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้า phasor ที่เป็นองค์ประกอบย่อยของ Symmetrical component ที่มีการจัดลำดับใหม่ โดยรวมกันทาง phasor ดังรูปที่ 3.5 เราจึงเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับ (Sequence Voltage) แต่โดยทั่วไปแล้ว Sequence Voltage มักหมายถึง V_{a1}, V_{a2}, V_{a0} เท่านั้น ซึ่งจะต้องเข้าใจว่า Sequence Voltage เป็นค่าต่อเฟส เพราะเป็นค่าที่พิจารณาจากเฟส a เพียงเฟสเดียวโดยที่

V_{a1} = voltageของเฟส a ที่มีการเรียงลำดับเป็นบวก (Positive Sequence Voltage)

V_{a2} = voltageของเฟส a ที่มีการเรียงลำดับเป็นลบ (Negative Sequence Voltage)

V_{a0} = voltageของเฟส a ที่มีการเรียงลำดับเป็นศูนย์ (Zero Sequence Voltage)

3.2 โอเปอร์เรเตอร์ a (The Operator a)

การใช้ Symmetrical component กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะต้องหมุน phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าไปเปรียบเทียบกับ phasor ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาเสมอ ดังนั้น เพื่อพิจารณาได้ง่ายจึงกำหนดสัญลักษณ์แทนมุม 120 องศา เรียกว่า " โอเปอร์เรเตอร์ a " ซึ่งมีค่าดังนี้

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120 + j\sin 120 = -1/2 + j\sqrt{3}/2$$

$$|a| = |e^{j120}| = 1$$

จาก

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \qquad (3.4)$$

$$\begin{aligned} V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ &= V_{a1}e^{-j120} + V_{a2}e^{+j120} + V_{a0} \\ &= a^2V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0} \qquad (3.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \\ &= V_{a1}e^{j+120} + V_{a2}e^{-j120} + V_{a0} \\ &= aV_{a1} + a^2V_{a2} + V_{a0} \qquad (3.6) \end{aligned}$$

ดังนั้นจัดในรูป matrix ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \qquad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \qquad (3.8)$$

นำหลักการดังกล่าวข้างต้นมาใช้หาค่ากระแสไฟฟ้าเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลได้เช่นกัน กล่าวคือ

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

Voltage เป็นค่าต่อเฟส เพราะเป็นค่าที่พิจารณาจากเฟส a เพียงเฟสเดียวโดยที่

I_{a1} = กระแสของเฟส a ที่มีการเรียงลำดับเป็นบวก (Positive Sequence Current)

I_{a2} = กระแสของเฟส a ที่มีการเรียงลำดับเป็นลบ (Negative Sequence Current)

I_{a3} = กระแสของเฟส a ที่มีการเรียงลำดับเป็นศูนย์ (Zero Sequence Current)

แสดงได้ในรูปของ โอเปอร์เรเตอร์ a ดังนี้

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$= I_{a1} e^{-j120} + I_{a2} e^{+j120} + I_{a0}$$

$$= a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

$$= I_{a1} e^{j+120} + I_{a2} e^{-j120} + I_{a0}$$

$$= a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0}$$

ดังนั้นจัดในรูป matrix ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

บทที่ 4
การออกแบบวงจรสมดุลในการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส

4.1 บทนำ

ระบบการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนนั้น ในบางครั้งอาจจะประสบกับปัญหาไม่มีแหล่งจ่ายไฟชนิดสามเฟสให้ใช้ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส หรือแม้กระทั่งจะต้องการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส มาประยุกต์ใช้ในบางกรณีกับระบบไฟ 1 เฟส แม้ว่าจะมีระบบไฟชนิด 3 เฟสอยู่ก็ตาม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นและถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมาก ถ้าสามารถประยุกต์การใช้งานของมอเตอร์ชนิด 3 เฟสมาใช้กับระบบไฟ 1 เฟสให้ได้ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึง ความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีที่จะนำมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสมาใช้งานในระบบไฟ 1 เฟสได้ โดยมีตัวคาปาซิเตอร์เป็นตัวปรับความสมดุลของเฟส และจะพิจารณาถึงผลของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ต่อสมรรถนะของมอเตอร์คือได้กรณีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

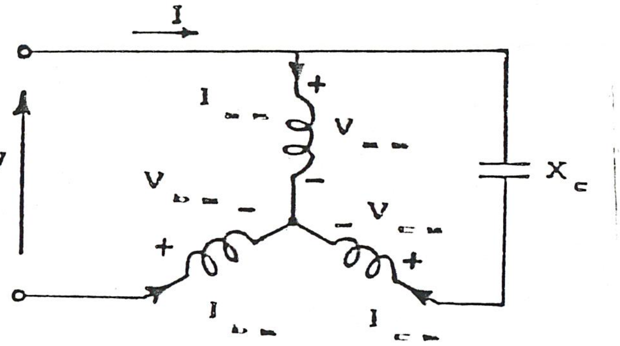
4.2 วิธีการคำนวณหาค่า reactance

แบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

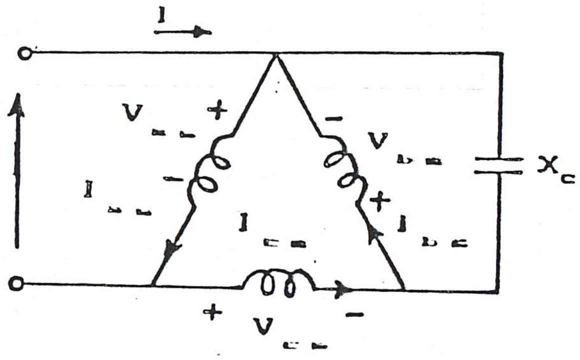
1. วิธีลองผิดลองถูก (trial and error)
2. วิธีทำให้ negative sequence มีค่าเท่ากับศูนย์
3. วิธีการใช้ differentiate เพื่อต้องการหาค่า reactance

1. วิธีลองผิดลองถูก (trial and error)

การลองผิดลองถูกทำได้โดยการต่อพ่วงคาปาซิเตอร์ (capacitors) กับขดลวดของ stator ดังรูป 4.1 โดยต่อในขณะที่ทำการ run มอเตอร์ ซึ่งยังไม่ได้ต่อภาระ (loads) เข้าไป แล้วทำการวัดค่ากระแสที่ไหลในขดลวดอยู่กับที่ (stator) และทำการเปลี่ยนค่าความจุของ คาปาซิเตอร์ไปเรื่อยๆ จนกว่ากระแสที่วัดได้ในขดลวดอยู่กับที่มีค่าประมาณ 90-95 % ของกระแสที่บนแผ่นป้าย (name plate)



การต่อแบบ star

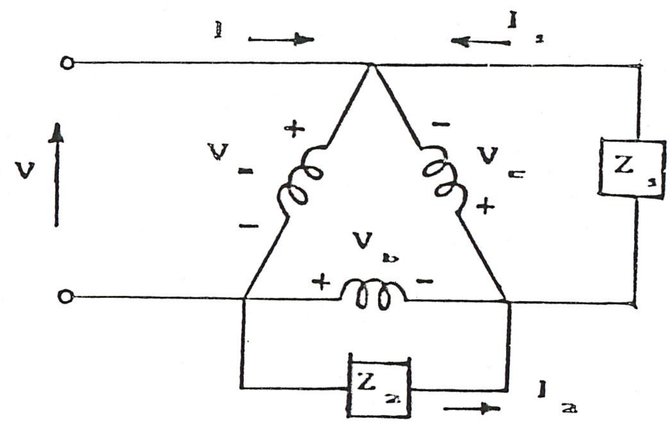


การต่อแบบ delta

รูปที่ 4.1 การต่อโดยวิธีลองผิดลองถูก

2. <u>วิธีทำให้ negative sequence มีค่าเท่ากับศูนย์</u>

2.1 <u>การต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ 2 ชุดเข้ากับขดลวดสเตเตอร์</u> ภาวะสมดุลเกิดขึ้นเมื่อเทอม Negative เท่ากับ 0 โดยใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical component) เนื่องจากในภาวะปกตินั้น การ operate ของเตอร์ขณะนั้นจะมีเพียง Positive sequence เท่านั้น แต่ในภาวะผิดปกติจะเกิดองค์ประกอบ Negative sequence ขึ้นมาด้วย ดังนั้นในการคำนวณจะต้องนำผลลัพธ์นี้มาคิดด้วย สำหรับผลของ Zero sequence voltage and Zero sequence current จะมีค่าเป็น 0



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ 2 ชุด เข้ากับขดลวด stator

จากรูป Z_1 , Z_2 เป็นเฟสบาลานซ์เซอร์

สมการแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ในที่นี้กระแสและอิมพีแดนซ์ด้าน rotor ถูก refer ไปด้าน stator)

$$V = V_a \qquad (4.2.1)$$

$$0 = V_a + V_b + V_c \qquad (4.2.2)$$

$$V_c = I_1 Z_1 \qquad (4.2.3)$$

$$V_b = I_2 Z_2 \qquad (4.2.4)$$

$$I_1 = I_b + I_2 - I_c \qquad (4.2.5)$$

จากสมการที่ (4.2.2),(4.2.3),(4.2.4)

$$V_c = Z_1 * (I_b + V_b/Z_2 - I_c) \qquad (4.2.6)$$

แทนค่าองค์ประกอบสมมาตรในสมการที่ (4.2.6)

$$V_{c1} + V_{c2} = Z_1 * [I_{b1} + I_{b2} + (V_{b1} + V_{b2})/Z_2 - (I_{c1} + I_{c2})]$$

$$aV_{a1} + a^2 V_{a2} = Z_1 * [a^2 I_{a1} + aI_{a2} + (a^2 V_{a1} + aV_{a2})/Z_2 - (aI_{a1} + a^2 I_{a2})]$$

$$= Z_1 * [a^2 V_{a1}/Z^p + aV_{a2}/Z^n + (a^2 V_{a1} + aV_{a2})/Z_2 - (aV_{a1}/Z^p + a^2 V_{a2}/Z^n)]$$

จัดสมการ

$$V_{a1} * [a - Z_1 a^2/Z_2 - Z_1/Z^p (a^2 - a)] + V_{a2} * [a^2 - Z_1 a/Z_2 - Z_1/Z_n (a - a^2)] = 0 \qquad (4.2.7)$$

$V = V_{a} = 1/\sqrt{3}\ (V_{a1} + V_{a2})$; $V_{a0} = 0$

ภาวะสมดุลเกิดขึ้นเมื่อเทอม Negative Sequence เป็นศูนย์ ($V_{a2} = 0$)

จากสมการที่ (4.2.7)

$$V_{a1}*[a - Z_1 a^2/Z_2 - Z_1/Z^p(a^2 - a)] = 0$$

$$a - Z_1 a^2/Z_2 - Z_1/Z^p(a^2 - a) = 0$$

$$Z^p = Z_1 Z_2(a^2 - a)/(aZ_2 - a^2 Z_1)$$

$$= Z_1 Z_2(a - a^2)/(a^2 Z_1 - aZ_2) \qquad (4.2.8)$$

ให้ $Z^p = R^p + jX^p$

โดยที่ Z^p เป็น Positive Sequence impedance

R^p เป็น Positive Sequence resistance

X^p เป็น Positive Sequence reactance

สำหรับ Z_1 และ Z_2 เป็นเฟสบาลานซ์เซอร์ที่นำมาต่อ เพื่อให้มีการสูญเสียกำลังน้อยที่สุดควรเป็นค่า reactance บริสุทธิ์ (ถ้ามี resistance จะเกิดการ drop และเกิด power loss)

ดังนั้น $Z_1 = jX_1$

$Z_2 = jX_2$

โดยค่า X_1 และ X_2 อาจมีค่าเป็นบวกหรือค่าลบก็ได้ สมการที่(4.2.8)แทนค่า Z_1, Z_2

$$R^p + jX^p = jX_1 * jX_2(a - a^2)/(a^2 jX_1 - ajX_2) \qquad (4.2.9)$$

แทนค่า $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ ลงในสมการ (4.2.9)

$$R^p + jX^p = jX_1 X_2(j\sqrt{3})/(a^2 X_1 - aX_2)$$

$$= \sqrt{3}\ X_1 X_2 /[1/2(X_1 - X_2) + j\sqrt{3}/2(X_1 + X_2)]$$

ใช้ conjugate คูณ

$$R^p + jX^p = \sqrt{3}X_1 X_2 * [1/2(X_1 - X_2) - j\sqrt{3}/2(X_1 + X_2)] / (X_1^2 + X_2^2 + X_1 X_2) \qquad (4.2.10)$$

แยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.2.10)

$$R^p = \sqrt{3}X_1 X_2 * (X_1 - X_2)/2(X_1^2 + X_2^2 + X_1 X_2)$$

$$X^p = -3X_1 X_2(X_1 + X_2)/2(X_1^2 + X_2^2 + X_1 X_2) \qquad (4.2.11)$$

จะได้ $X^p/R^p = -\sqrt{3}(X_1 + X_2)/(X_1 - X_2)$

$$X_2 = (X^p + \sqrt{3}R^p) * X_1 / (X^p - \sqrt{3}R^p) \qquad (4.2.12)$$

แทนค่าสมการ (4.2.12)ลงใน (4.2.11)

$$X_1 = -[(X^p)^2+(R^p)^2] / (X^p+\sqrt{3}R^p) \qquad (4.2.13)$$

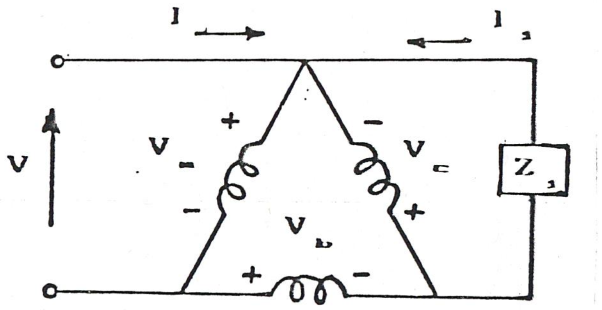
และจากสมการ (4.2.12)

$$X_2 = -[(X^p)^2+(R^p)^2] / (X^p-\sqrt{3}R^p) \qquad (4.2.14)$$

ดังนั้นกรณีค่า X_1, X_2 เป็นลบ จะเป็นค่าความจุ

กรณีค่า X_1, X_2 เป็นบวก จะเป็นค่าความเหนี่ยวนำ

2.2 <u>การต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ 1 ชุดเข้ากับขดลวดสเตเตอร์</u>



รูปที่ 4.3 แสดงการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ 1 ชุด เข้ากับขดลวด stator

$$V_c = I_1 Z_1 \qquad (4.2.15)$$

$$I_b = I_1 + I_c \qquad (4.2.16)$$

จากสมการที่ (4.2.15),(4.2.16)

$$V_c = Z_1 * (I_b - I_c)$$

$$V_{c1} + V_{c2} = Z_1 * [I_{b1} + I_{b2} - (I_{c1} + I_{c2})]$$

$$aV_{a1} + a^2 V_{a2} = Z_1 * [a^2 I_{a1} + a I_{a2} - (a I_{a1} + a^2 I_{a2})]$$

$$= Z_1 * [a^2 V_{a1}/Z^p + a V_{a2}/Z^n - (a V_{a1}/Z^p + a^2 V_{a2}/Z^n)]$$

$$V_{a1} * [a - Z_1 a^2/Z^p + Z_1 a/Z^p] + V_{a2} * [a^2 - Z_1 a/Z^n + Z_1 a^2/Z_n] = 0$$

ภาวะสมดุลเกิดขึ้นเมื่อเทอม Negative Sequence เป็นศูนย์ ($V_{a2} = 0$)

$$V_{a1} * [a - Z_1/Z^p(a^2-a)] = 0$$

$$a - Z_1/Z^p(a^2-a) = 0$$

$$Z^p = Z_1(a^2-a)/a$$

$$Z^{P} = Z_{1}(a-1)$$

$$Z_{1} = Z^{P} * e^{-j150^{\circ}}/\sqrt{3}$$

ดังนั้นขนาดของ $Z_{1} = Z^{P}/\sqrt{3}$

3. วิธีการใช้ differentiate เพื่อต้องการหาค่า reactance

คุณสมบัติของสมรรถนะขณะปฏิบัติงานของมอเตอร์ จะถูกกำหนดโดยค่าของ phase balancer capacitor เป็นหลัก ซึ่งแต่ละสมรรถนะจะต้องใช้คาปาซิเตอร์ขนาดต่างกันในการทำงานแต่ละสภาวะ

เงื่อนไขที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ประสิทธิภาพ $= P_{o/p} / P_{i/p}$

การคำนวณจะทำการใช้วิธีองค์ประกอบสมมาตรเป็นการหาสมรรถนะของมอเตอร์คือ ประสิทธิภาพจากผลที่ได้จะถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกคาปาซิเตอร์ที่ทำให้เกิดการสมดุลของเฟสที่เหมาะสม

แรงดันไฟที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส สามารถเขียนได้ในเทอมขององค์ประกอบสมมาตร โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

หมายเหตุ ให้ V_0 , V_1 , V_2 อ้างอิงที่ เฟส A โดยมีค่าเท่ากับ

$V_0 = V_{a0}$,$V_1 = V_{a1}$, $V_2 = V_{a2}$

ลำดับแรงดัน (sequence voltage) และลำดับกระแส (sequence currents) มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$V_1 = I_1 Z_1$$

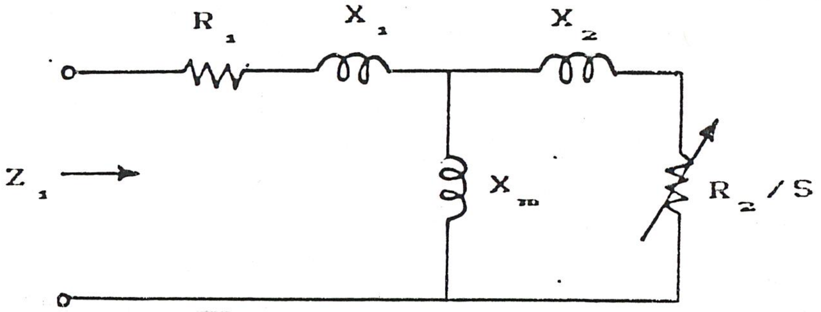
$$V_2 = I_2 Z_2$$

ในการพิจารณาโดยการหาอนุพันธ์นั้นจะพิจารณาโดยที่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ (V_0, I_0) จะมีค่าเป็นศูนย์

โดย Z_1 และ Z_2 คืออิมพิแดนซ์อนุกรมลำดับบวกและอิมพิแดนซ์อนุกรมลำดับลบของมอเตอร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองต่อไปนี้

1. ข้อมูลจากการทดลองขณะไม่มีโหลด (no-load test)
2. ข้อมูลจากการทดลองเมื่อให้โรเตอร์หยุดหมุน (lock-rotor test)
3. การทดลองหาความต้านทานของสเตเตอร์

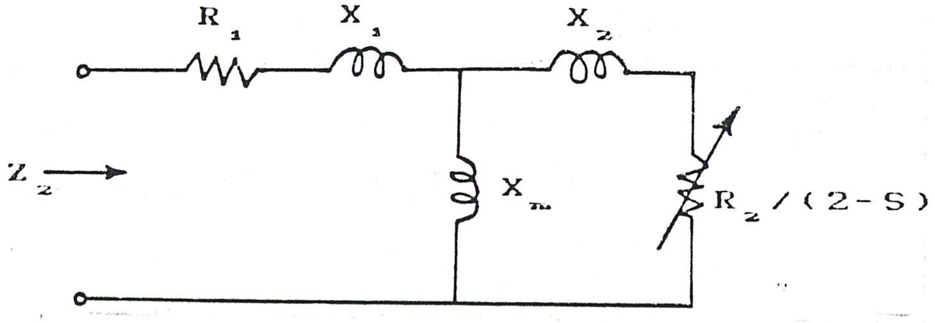
การหาค่า Z_1 (Positive Sequence Impedance ; Z_p)



รูปที่ 4.4 แสดง Positive Sequence Impedance ของมอเตอร์

$Z_1 = (R_1+jX_1)+ [(jX_m)(R_2/S+jX_2)] / [R_2/S+j(X_2+X_m)]$

การหาค่า Z_2 (Negaitive Sequence Impedance ; Z_n)



รูปที่ 4.5 แสดง Negative Sequence Impedance ของมอเตอร์

$Z_2 = (R_1+jX_1)+ [(jX_m)(R_2/(2-S)+jX_2)] / [R_2/(2-S)+j(X_2+X_m)]$

จากสมการ $\eta = P_{o/p} / P_{i/p}$

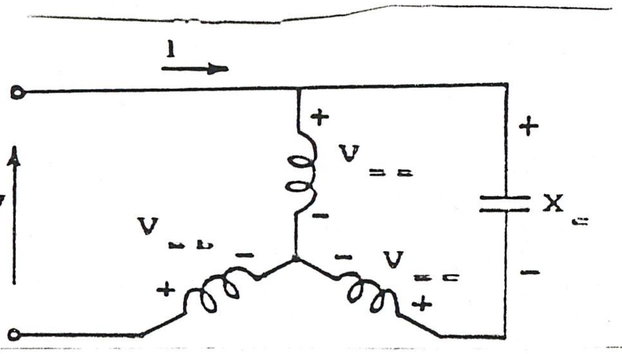
ทำการ differentiate

$$d\eta/dX_c = d\eta/dU * dU/dX_c$$

จากสมการ $d\eta / dX_c$ เมื่อ $d\eta / dX_c = 0$ แสดงว่าประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นที่ค่า X_c ให้ค่าสูงสุดนั่นคือ เมื่อพิจารณาการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียเชิงกลแล้วจะถือว่าค่าความแตกต่างของค่าตัวเก็บประจุที่สอดคล้องกับ U และประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าน้อยมาก

ในการหาค่าคาปาซิเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้งาน ในกรณีที่ให้สมรรถนะทางประสิทธิภาพสูงสุดนั้น สามารถพิจารณาได้ 4 กรณีตามลักษณะการต่อขดลวดทางด้านสเตเตอร์และการต่อตัวคาปาซิเตอร์กับขดลวดทางด้านสเตเตอร์ได้ดังกรณีต่อไปนี้

(3.1) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ star (แบบที่ 1) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star แบบที่ 1

$$V = V_{sa} - V_{sb} \qquad (4.3.1.1)$$

$$V_{sa} = V_z + V_{sc} = (1/j\omega c * I_{cs}) + V_{sc}$$

$$V_{sa} = (-jX_c * I_{cs}) + V_{sc} \qquad (4.3.1.2)$$

โดย V = voltage จากแหล่งจ่ายไฟ

X_c = capacitive reactance

และจากความสัมพันธ์ Symmetrical Component จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

<u>หมายเหตุ</u> ให้ V_0 , V_1 , V_2 อ้างอิงที่ เฟส A โดยมีค่าเท่ากับ $V_0 = V_{a0}$,

$V_1 = V_{a1}$, $V_2 = V_{a2}$

$$V_1 = I_1 Z_1$$

$$V_2 = I_2 Z_2$$

โดย Z_1 = positive sequence impedance

Z_2 = negative sequence impedance

ทำการแก้สมการเพื่อหาค่า V_1, V_2

$$V_1 + V_2 = -jX_c(aV_1y_1 + a^2V_2y_2) + aV_1 + a^2V_2$$

$$V_1 + V_2 = -jX_c aV_1y_1 - jX_c a^2V_2y_2 + aV_1 + a^2V_2$$

$$(1+jX_c ay_1 - a)*V_1 = (a^2 - 1 - jX_c a^2 y_2)*V_2$$

จัดรูปได้

$$V_1 = V_2*(a^2-1-jX_c a^2 y_2)/(1-a+jX_c ay_1) \qquad (4.3.1.3)$$

$$V_2 = V_1*(1-a+jX_c ay_1)/(a^2-1-jX_c a^2 y_2) \qquad (4.3.1.4)$$

โดยค่า $y_1 = 1/Z_1$

$y_2 = 1/Z_2$

$$V = V_{aa} - V_{ab}$$

$$V = V_1 + V_2 - a^2V_1 - aV_2$$

$$V = (1-a^2)V_1 + (1-a)V_2 \qquad (4.3.1.5)$$

(4.3.1.4) แทน (4.3.1.5) เพื่อหาค่า V_1

$$V = (1-a^2)V_1 + (1-a)*[(1+jX_c ay_1 - a)/(a^2-1-jX_c a^2 y_2)]*V_1$$

จาก $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$

$$V = V_1*[(1-a^2)(a^2-1-jX_c a^2 y_2) + (1-a)(1+jX_c ay_1 - a)] / (a^2-1-jX_c a^2 y_2)]$$

$$V = \left[\frac{a^2-1-jX_c a^2 y_2 - a^4 + a^2 + jX_c a^4 y_2 + 1 - a + jX_c ay_1 - a + a^2 - jX_c a^2 y_1}{(a^2-1-jX_c a^2 y_2)} \right]*V_1$$

$$V = \left[\frac{3a^2 - 3a - jX_c a^2 y_2 + jX_c ay_2 + jX_c ay_1 - jX_c a^2 y_1}{(a^2-1-jX_c a^2 y_2)} \right]*V_1$$

$$V = \left[\frac{(a^2-a)*(3-jX_c y_2 - jX_c y_1)}{(a^2-1-jX_c a^2 y_2)} \right] * V_1$$

โดย $a^2-a = (-1/2+j\sqrt{3}/2)^2 - (-1/2+j\sqrt{3}/2)$

$= (1/4-j\sqrt{3}/2-3/4)-(-1/2+j\sqrt{3}/2)$

$= -j\sqrt{3}$

$$V = \left[\frac{-\sqrt{3}j*(3-jX_c y_2-jX_c y_1)}{(-1/2-j\sqrt{3}/2)-1-jX_c(-1/2-j\sqrt{3}/2)y_2} \right] * V_1$$

$$V = \left[\frac{-3\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c y_2-\sqrt{3}X_c y_1}{-3/2-j\sqrt{3}/2+1/2jX_c y_2-\sqrt{3}/2X_c y_2} \right] * V_1$$

$$V_1 = \left[\frac{-3/2-j\sqrt{3}/2+1/2jX_c y_2-\sqrt{3}/2X_c y_2}{-3\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c y_2-\sqrt{3}X_c y_1} \right] * V \qquad (*********)$$

หา V_2 โดย (4.3.1.3) แทน (4.3.1.5)

$$V = (1-a^2)V_1 + (1-a)V_2$$

$$V = (1-a^2)[(a^2-1-jX_c a^2 y_2)/(1+jX_c y_1-a)]+(1-a)*V_2$$

จาก $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$

$$V = [(1-a^2)(a^2-1-jX_c a^2 y_2)+(1-a)(1+jX_c a y_1-a)]/(1+jX_c a y_1-a)] *V_2$$

$$V = \left[\frac{a^2-1-jX_c a^2 y_2-a^4+a^2+jX_c a^4 y_2+1-a+jX_c a y_1-a+a^2-jX_c a^2 y_1}{(1-a+jX_c a y_1)} \right]*V_2$$

$$V = \left[\frac{3a^2-3a-jX_c a^2 y_2+jX_c a y_2+jX_c a y_1-jX_c a^2 y_1}{(1-a+jX_c a y_1)} \right]*V_2$$

$$V = \left[\frac{(a^2-a)*(3-jX_c y_2-jX_c y_1)}{(1-a+jX_c a y_1)} \right] * V_2$$

โดย $a^2-a = (-1/2+j\sqrt{3}/2)^2 - (-1/2+j\sqrt{3}/2)$

$= (1/4-j\sqrt{3}/2-3/4)-(-1/2+j\sqrt{3}/2)$

$= -j\sqrt{3}$

$$V = \left[\frac{-\sqrt{3}j*(3-jX_c y_2-jX_c y_1)}{1+1/2-j\sqrt{3}/2+jX_c(-1/2+j\sqrt{3}/2)y_1} \right] * V_2$$

$$V = \left[\frac{-3\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c y_2-\sqrt{3}X_c y_1}{3/2-j\sqrt{3}/2-1/2jX_c y_1-\sqrt{3}/2X_c y_1} \right] * V_2$$

$$V_2 = \left[\frac{3/2 - j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c y_1 - \sqrt{3}/2X_c y_1}{-3\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c y_2 - \sqrt{3}X_c y_1} \right] * V \qquad (*********)$$

พิจารณาค่า X_c ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ให้ค่า $U = |V_2| / |V_1|$

จากสมการ

$$V_1 = \left[\frac{-3/2 - j\sqrt{3}/2 + 1/2jX_c y_2 - \sqrt{3}/2X_c y_2}{-3\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c y_2 - \sqrt{3}X_c y_1} \right] * V$$

$$V_2 = \left[\frac{3/2 - j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c y_1 - \sqrt{3}/2X_c y_1}{-3\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c y_2 - \sqrt{3}X_c y_1} \right] * V$$

$$U = |V_2| / |V_1|$$

$$= \left| 3/2 - j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c y_1 - \sqrt{3}/2X_c y_1 \right| / \left| -3/2 - j\sqrt{3}/2 + 1/2jX_c y_2 - \sqrt{3}/2X_c y_2 \right|$$

$$= \left| 3/2 - j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c y_1 - \sqrt{3}/2X_c y_1 \right| / \left| 3/2 + j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c y_2 + \sqrt{3}/2X_c y_2 \right|$$

จัดรูป y_1, y_2 ให้อยู่ในรูปขนาดและมุม

โดย Y_1 = ขนาดของ admittance (y_1) ϕ_1 = มุมของ admittance (y_1)

Y_2 = ขนาดของ admittance (y_2) ϕ_2 = มุมของ admittance (y_2)

$$U = \left| 3/2 - j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c Y_1(\cos\phi_1 + j\sin\phi_1) - \sqrt{3}/2X_c Y_1(\cos\phi_1 + j\sin\phi_1) \right| /$$

$$\left| 3/2 + j\sqrt{3}/2 - 1/2jX_c Y_2(\cos\phi_2 + j\sin\phi_2) + \sqrt{3}/2X_c Y_2(\cos\phi_2 + j\sin\phi_2) \right|$$

$$U = \left| (3/2 - \sqrt{3}/2X_c Y_1\cos\phi_1 + 1/2X_c Y_1\sin\phi_1) + j(-\sqrt{3}/2 - \sqrt{3}/2X_c Y_1\sin\phi_1 \right.$$

$$\left. - 1/2X_c Y_1\cos\phi_1) \right| / \left| (3/2 + \sqrt{3}/2X_c Y_2\cos\phi_2 + 1/2X_c Y_2\sin\phi_2) + j(\sqrt{3}/2 \right.$$

$$\left. + \sqrt{3}/2X_c Y_2\sin\phi_2 - 1/2X_c Y_2\cos\phi_2) \right|$$

$$U = [(3/2-\sqrt{3}/2X_cY_1\cos\phi_1+1/2X_cY_1\sin\phi_1)^2+(-\sqrt{3}/2-\sqrt{3}/2X_cY_1\sin\phi_1$$
$$-1/2X_cY_1\cos\phi_1)^2]^{1/2} \;/\; [(3/2+\sqrt{3}/2X_cY_2\cos\phi_2+1/2X_cY_2\sin\phi_2)^2 +$$
$$(\sqrt{3}/2+\sqrt{3}/2X_cY_2\sin\phi_2-1/2X_cY_2\cos\phi_2)^2]^{1/2}$$

$$U = [(3+3X_cY_1\sin\phi_1-\sqrt{3}X_cY_1\cos\phi_1+X_c^2Y_1^2\sin\phi_1^2+X_c^2Y_1^2\cos\phi_1^2\;]^{1/2} \;/$$
$$[(3+3X_cY_2\sin\phi_2+\sqrt{3}X_cY_2\cos\phi_2+X_c^2Y_2^2\sin\phi_2^2+X_c^2Y_2^2\cos\phi_2^2\;]^{1/2}$$

$$U = [3+X_c^2Y_1^2+X_cY_1(3\sin\phi_1-\sqrt{3}\cos\phi_1)\;]^{1/2} \;/\; [3+X_c^2Y_2^2+X_cY_2(3\sin\phi_2$$
$$+\sqrt{3}\cos\phi_2\;]^{1/2}$$

$$U = [(3+X_c^2Y_1^2+X_cY_1K_1) \;/\; (3+X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2)\;]^{1/2}$$

โดย $K_1 = 3\sin\phi_1-\sqrt{3}\cos\phi_1$

$K_2 = 3\sin\phi_2+\sqrt{3}\cos\phi_2$

โดยการหาอนุพันธ์ U เทียบกับ X_c เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่า unbalance ที่น้อยสุด (minimum unbalance) ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันกับการหาค่าประสิทธิภาพสูงสุด

$$dU/dX_c = 0$$

$$1/2*[1/(3+X_cY_2K_2+X_c^2Y_2^2)^2]*[(3+X_c^2Y_1^2+X_cY_1K_1)/(3+X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2)]^{-1/2}$$
$$*\;[(3+X_cY_2K_2+X_c^2Y_2^2)(Y_1K_1+2X_cY_1^2)-(3+X_cY_1K_1+X_c^2Y_1^2)(Y_2K_2+2X_cY_2^2)]=0$$

$$(3+X_cY_2K_2+X_c^2Y_2^2)(Y_1K_1+2X_cY_1^2) = (3+X_cY_1K_1+X_c^2Y_1^2)(Y_2K_2+2X_cY_2^2)$$

$$K_2Y_2Y_1^2X_c^2-K_1Y_1Y_2^2X_c^2+6Y_1^2X_c-6Y_2^2X_c+3K_1Y_1-3K_2Y_2 = 0$$

$$(K_2Y_2Y_1^2-K_1Y_1Y_2^2)X_c^2+(6Y_1^2-6Y_2^2)X_c+(3K_1Y_1-3K_2Y_2) = 0$$

$$Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+3(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

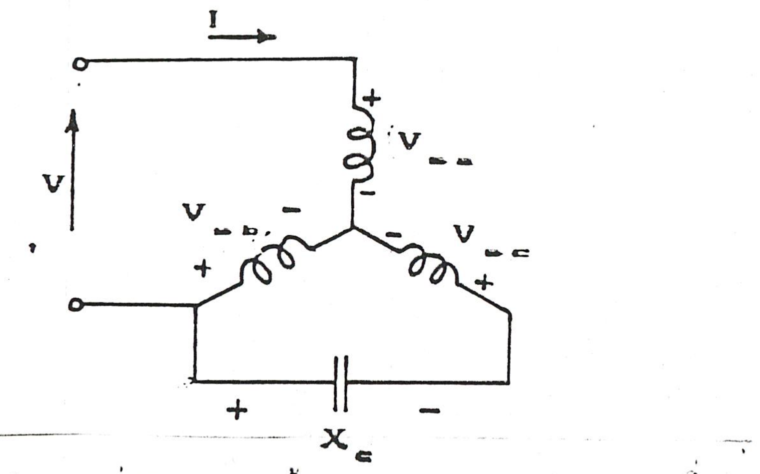
โดย $A = Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = 3(K_1Y_1-K_2Y_2)$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

(3.2) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ star (แบบที่ 2) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.7 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star แบบที่ 2

$$V = V_{sa} - V_{sb} \quad (4.3.2.1)$$

$$V_{sb} = V_{z} + V_{sc} = (1/j\omega c * I_{cs}) + V_{sc}$$

$$V_{sa} = (-jX_{c} * I_{cs}) + V_{sc} \quad (4.3.2.2)$$

โดย V = voltage จากแหล่งจ่ายไฟ

X_c = capacitive reactance

และจากความสัมพันธ์ Symmetrical Component จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

<u>หมายเหตุ</u> ให้ V_0 , V_1 , V_2 อ้างอิงที่ เฟส A โดยมีค่าเท่ากับ $V_0 = V_{a0}$,

$V_1 = V_{a1}$, $V_2 = V_{a2}$

$$V_1 = I_1 Z_1$$

$$V_2 = I_2 Z_2$$

โดย Z_1 = positive sequence impedance

Z_2 = negative sequence impedance

ทำการแก้สมการเพื่อหาค่า V_1,V_2

$$a^2V_1+aV_2 = -jX_c(aV_1y_1+a^2V_2y_2) + aV_1 + a^2V_2$$

$$(a^2-a+jX_c ay_1)*V_1 = (a^2-a-jX_c a^2y_2)*V_2$$

จัดรูปได้

$$V_1 = V_2*(a^2-a-jX_c a^2y_2)/(a^2-a+jX_c ay_1) \qquad (4.3.2.3)$$

$$V_2 = V_1*(a^2-a+jX_c ay_1)/(a^2-a-jX_c a^2y_2) \qquad (4.3.2.4)$$

โดยค่า $y_1 = 1/Z_1$

$y_2 = 1/Z_2$

$$V = V_{aa} - V_{ab}$$

$$V = V_1 + V_2 - a^2V_1 - aV_2$$

$$V = (1-a^2)V_1 + (1-a)V_2 \qquad (4.3.2.5)$$

(4.3.2.4) แทน (4.3.2.5) เพื่อหาค่า V_1

$$V = (1-a^2)V_1+(1-a)*[(a^2-a+jX_c ay_1)/(a^2-a-jX_c a^2y_2)]*V_1$$

จาก $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$

$$V = V_1*[(1-a^2)(a^2-a-jX_c a^2y_2)+(1-a)(a^2-a+jX_c ay_1)]/(a^2-a-jX_c a^2y_2)]$$

$$V = \left[\frac{a^2-a-jX_c a^2y_2-a^4+a^3+jX_c a^4y_2+a^2-a+jX_c ay_1-a^3+a^2-jX_c a^2y_1}{(a^2-a-jX_c a^2y_2)}\right]*V_1$$

$$V = \left[\frac{3a^2-3a-jX_c a^2y_2+jX_c ay_2+jX_c ay_1-jX_c a^2y_1}{(a^2-a-jX_c a^2y_2)}\right]*V_1$$

$$V = \left[\frac{(a^2-a)*(3-jX_c y_2-jX_c y_1)}{(a^2-a-jX_c a^2y_2)}\right]*V_1$$

โดย $a^2-a = (-1/2+j\sqrt{3}/2)^2 - (-1/2+j\sqrt{3}/2)$

$= (1/4-j\sqrt{3}/2-3/4)-(-1/2+j\sqrt{3}/2)$

$= -j\sqrt{3}$

$$V = \left[\frac{-3\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c y_2-\sqrt{3}X_c y_1}{-j\sqrt{3}-jX_c(-1/2-j\sqrt{3}/2)y_2}\right]*V_1$$

$$V_1 = \left[\frac{-j\sqrt{3}-jX_c(-1/2-j\sqrt{3}/2)y_2}{-3\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c y_2-\sqrt{3}X_c y_1}\right]*V \qquad (********)$$

หา V_2 โดย (4.3.2.3) แทน (4.3.2.5)

$$V = (1-a^2)V_1 + (1-a)V_2$$

$$V = (1-a^2)[(a^2-a-jX_c a^2 y_2)/(a^2-a+jX_c a y_1)]*V_2 + (1-a)* V_2$$

จาก $a = -1/2 + j\surd 3/2$

$$V = V_2*[(1-a^2)(a^2-a-jX_c a^2 y_2)+(1- a)(a^2-a+jX_c a y_1)]/(a^2-a+jX_c a^2 y_1)]$$

$$V = [\frac{a^2-a-jX_c a^4 y_2-a^4+a^3+jX_c a^4 y_2+a^3-a+jX_c a y_1-a^3+a^2-jX_c a^2 y_1}{(a^2-a+jX_c a^2 y_1)}]*V_2$$

$$V = [\frac{3a^2-3a-jX_c a^2 y_2+jX_c a y_2+jX_c a y_1-jX_c a^2 y_1}{(a^2-a+jX_c a^2 y_1)}]*V_2$$

$$V = [\frac{(a^2-a)*(3-jX_c y_2-jX_c y_1)}{(a^2-a+jX_c a^2 y_1)}] * V_2$$

โดย $a^2-a = (-1/2+j\surd 3/2)^2 - (-1/2+j\surd 3/2)$

$$= -j\surd 3$$

$$V = [\frac{-3\surd 3j-\surd 3X_c y_2-\surd 3X_c y_1}{-j\surd 3+jX_c(-1/2-j\surd 3/2)y_1}] * V_2$$

$$V_2 = [\frac{-j\surd 3+jX_c(-1/2-j\surd 3/2)y_1}{-3\surd 3j-\surd 3X_c y_2-\surd 3X_c y_1}] * V \qquad (*********)$$

พิจารณาค่า X_c ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ให้ค่า $U = |V_2|/|V_1|$

จากสมการ

$$V_1 = [\frac{-j\surd 3-jX_c(-1/2-j\surd 3/2)y_2}{-3\surd 3j-\surd 3X_c y_2-\surd 3X_c y_1}] * V$$

$$V_2 = [\frac{-j\surd 3+jX_c(-1/2-j\surd 3/2)y_1}{-3\surd 3j-\surd 3X_c y_2-\surd 3X_c y_1}] * V$$

$$U = |V_2|/|V_1|$$

$$= |-j\surd 3+jX_c(-1/2-j\surd 3/2)y_1| / |-j\surd 3-jX_c(-1/2-j\surd 3/2)y_2|$$

$$= |-j\surd 3-1/2jX_c y_1+\surd 3/2X_c y_1| / |-j\surd 3+1/2jX_c y_2-\surd 3/2X_c y_2|$$

จัดรูป y_1, y_2 ให้อยู่ในรูปขนาดและมุม

โดย Y_1 = ขนาดของ admittance (y_1) ϕ_1 = มุมของ admittance (y_1)

Y_2 = ขนาดของ admittance (y_2) ϕ_2 = มุมของ admittance (y_2)

$$U = \left| -j\sqrt{3}/2 - 1/2\,jX_cY_1(\cos\phi_1 + j\sin\phi_1) + \sqrt{3}/2\,X_cY_1(\cos\phi_1 + j\sin\phi_1) \right| \Big/$$

$$\left| -j\sqrt{3}/2 + 1/2\,jX_cY_2(\cos\phi_2 + j\sin\phi_2) - \sqrt{3}/2\,X_cY_2(\cos\phi_2 + j\sin\phi_2) \right|$$

$$U = [(-\sqrt{3}/2\,X_cY_1\cos\phi_1 + 1/2\,X_cY_1\sin\phi_1)^2 + (-\sqrt{3} - \sqrt{3}/2\,X_cY_1\sin\phi_1 - 1/2\,X_cY_1\cos\phi_1)^2]^{1/2} \;/\; [(-\sqrt{3}/2\,X_cY_2\cos\phi_2 - 1/2\,X_cY_2\sin\phi_2)^2 + (-\sqrt{3} - \sqrt{3}/2\,X_cY_2\sin\phi_2 + 1/2\,X_cY_2\cos\phi_2)^2]^{1/2}$$

$$U = [(3 + 3X_cY_1\sin\phi_1 + \sqrt{3}X_cY_1\cos\phi_1 + X_c^2Y_1^2\sin\phi_1^2 + X_c^2Y_1^2\cos\phi_1^2\ ]^{1/2} \;/\; [(3 + 3X_cY_2\sin\phi_2 - \sqrt{3}X_cY_2\cos\phi_2 + X_c^2Y_2^2\sin\phi_2^2 + X_c^2Y_2^2\cos\phi_2^2\ ]^{1/2}$$

$$U = [3 + X_c^2Y_1^2 + X_cY_1(\sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1)]^{1/2} \;/\; [3 + X_c^2Y_2^2 + X_cY_2(-\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2\ ]^{1/2}$$

$$U = [(3 + X_c^2Y_1^2 + X_cY_1K_1) \;/\; (3 + X_c^2Y_2^2 + X_cY_2K_2)\ ]^{1/2}$$

โดย $K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1$

$K_2 = -\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$

โดยการหาอนุพันธ์ U เทียบกับ X_c เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่า unbalance ที่น้อยสุด (minimum unbalance) ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันกับการหาค่าประสิทธิภาพสูงสุด

$$dU/dX_c = 0$$

$$1/2*[1/(3 + X_cY_2K_2 + X_c^2Y_2^2)^2]*[(3 + X_c^2Y_1^2 + X_cY_1K_1)/(3 + X_c^2Y_2^2 + X_cY_2K_2)]^{-1/2}$$
$$*\ [(3 + X_cY_2K_2 + X_c^2Y_2^2)(Y_1K_1 + 2X_cY_1^2) - (3 + X_cY_1K_1 + X_c^2Y_1^2)(Y_2K_2 + 2X_cY_2^2)] = 0$$

$$(3 + X_cY_2K_2 + X_c^2Y_2^2)(Y_1K_1 + 2X_cY_1^2) = (3 + X_cY_1K_1 + X_c^2Y_1^2)(Y_2K_2 + 2X_cY_2^2)$$

$$K_2Y_2Y_1^2X_c^2 - K_1Y_1Y_2^2X_c^2 + 6Y_1^2X_c - 6Y_2^2X_c + 3K_1Y_1 - 3K_2Y_2 = 0$$

$$(K_2Y_2Y_1^2 - K_1Y_1Y_2^2)X_c^2 + (6Y_1^2 - 6Y_2^2)X_c + (3K_1Y_1 - 3K_2Y_2) = 0$$

$$Y_1Y_2(K_2Y_1 - K_1Y_2)X_c^2 + 6(Y_1^2 - Y_2^2)X_c + 3(K_1Y_1 - K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

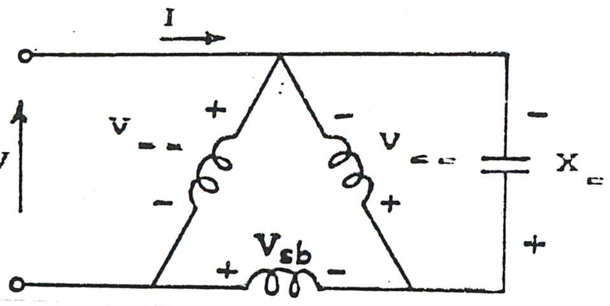
โดย $A = Y_1Y_2(K_2Y_1 - K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2 - Y_2^2)$

$C = 3(K_1 Y_1 - K_2 Y_2)$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

(3.3) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ delta (แบบที่ 1) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.8 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta แบบที่ 1

$$V = V_{sa} \qquad (4.3.3.1)$$

$$V_{sc} = V_z$$

$$I_z = I_{sb} - I_{sc}$$

$$V_{sc} - jX_c(I_{sc} - I_{sb}) = 0 \qquad (4.3.3.2)$$

โดย V = voltage จากแหล่งจ่ายไฟ

X_c = capacitive reactance

และจากความสัมพันธ์ Symmetrical Component จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

ทำการแก้สมการเพื่อหาค่า V_1, V_2

จากสมการ (4.3.3.2)

$$aV_1 + a^2V_2 = jX_c(aV_1y_1 + a^2V_2y_2 - a^2V_1y_1 - aV_2y_2)$$

$$aV_1 + a^2V_2 = jX_c[(a-a^2)V_1y_1+(a^2-a)V_2y_2]$$

$$= jX_c[\sqrt{3}jV_1y_1-\sqrt{3}jV_2y_2]$$

$$aV_1 + a^2V_2 = \sqrt{3}X_cV_2y_2-\sqrt{3}X_cV_1y_1$$

$$(a+\sqrt{3}X_cy_1)V_1 = (\sqrt{3}X_cy_2-a^2)V_2 \qquad (4.3.3.3)$$

จัดรูปได้

$$V_1 = [(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)/(a+\sqrt{3}X_cy_1)* V_2$$

$$V_2 = [(a+\sqrt{3}X_cy_1)/(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)* V_1$$

$$V = V_{aa} = V_1 + V_2 \qquad (4.3.3.4)$$

จาก (4.3.3.3) แทน V_2 เพื่อหา V ลงใน (4.3.3.4)

$$V = V_1 + [(a+\sqrt{3}X_cy_1)/(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)]* V_1$$

$$V = [(\sqrt{3}X_cy_1+\sqrt{3}X_cy_2+\sqrt{3}j)/(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)] * V_1$$

$$V = [(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))/(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)] * V_1$$

จัดรูป

$$V_1 = [(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)/(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))] * V$$

$$V_1 = [(a^2-\sqrt{3}X_cy_2)/(-\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))] * V$$

$$V_1 = [(-1/2-\sqrt{3}/2j-\sqrt{3}X_cy_2)/(-\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))]* V \qquad (*********)$$

จาก (4.3.3.4) แทน (4.3.3.3) ลงใน (4.3.3.4)

$$V = V_1 + V_2$$

$$V = [(\sqrt{3}X_cy_2-a^2)/(a+\sqrt{3}X_cy_1)* V_2 + V_2$$

$$V = [(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))/(a+\sqrt{3}X_cy_1)] * V_2$$

จัดรูป

$$V_2 = [(a+\sqrt{3}X_cy_1)/(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))] * V$$

$$V_2 = [-(a+\sqrt{3}X_cy_1)/(-\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))] * V$$

$$V_2 = [-(-1/2+\sqrt{3}/2j+\sqrt{3}X_cy_1)/(-\sqrt{3}j-\sqrt{3}X_c(y_1+y_2))]* V \qquad (*********)$$

$$U = \left|V_2\right|/\left|V_1\right|$$

$$= \left|(-1/2+\sqrt{3}/2j+\sqrt{3}X_cy_1)\right|/\left|(-1/2-\sqrt{3}/2j-\sqrt{3}X_cy_2)\right|$$

จัดรูป y_1, y_2 ให้อยู่ในรูปขนาดและมุม

โดย Y_1 = ขนาดของ admittance (y_1) ϕ_1 = มุมของ admittance (y_1)

Y_2 = ขนาดของ admittance (y_2) ϕ_2 = มุมของ admittance (y_2)

$$U = \left|-1/2+j\sqrt{3}/2+\sqrt{3}X_cY_1(\cos\phi_1+j\sin\phi_1)\right| / \left|-1/2-j\sqrt{3}/2-\sqrt{3}X_cY_2(\cos\phi_2+j\sin\phi_2)\right|$$

$$U = [(-1/2+\sqrt{3}X_cY_1\cos\phi_1)^2+(+\sqrt{3}/2+\sqrt{3}X_cY_1\sin\phi_1)^2]^{1/2} / [(-1/2-\sqrt{3}X_cY_2\cos\phi_2)^2+(-\sqrt{3}/2-\sqrt{3}X_cY_2\sin\phi_2)^2]^{1/2}$$

$$U = [1+3X_c^2Y_1^2-X_cY_1(\sqrt{3}\cos\phi_1-3\sin\phi_1)]^{1/2} / [1+3X_c^2Y_2^2+X_cY_2(\sqrt{3}\cos\phi_2+3\sin\phi_2)]^{1/2}$$

$$U = [1+3X_c^2Y_1^2-X_cY_1K_1]^{1/2} / [1+3X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2]^{1/2}$$

โดย $K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 - 3\sin\phi_1$

$K_2 = \sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$

โดยการหาอนุพันธ์ U เทียบกับ X_c เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่า unbalance ที่น้อยสุด (minimum unbalance) ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันกับการหาค่าประสิทธิภาพสูงสุด

$$dU/dX_c = 0$$

$$1/2*[1/(1+3X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2)^2] * [(1+3X_c^2Y_1^2-X_cY_1K_1)/(1+3X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2)]^{-1/2} * [(1+3X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2)(6X_cY_1^2-Y_1K_1)-(1+3X_c^2Y_1^2-X_cY_1K_1)(6X_cY_2^2+Y_2K_2) = 0$$

$$(1+3X_c^2Y_2^2+X_cY_2K_2)(6X_cY_1^2-Y_1K_1) = (1+3X_c^2Y_1^2-X_cY_1K_1)(6X_cY_2^2+Y_2K_2)$$

กระจายและจัดรูป

$$3K_2Y_2Y_1^2X_c^2+3K_1Y_1Y_2^2X_c^2+6Y_1^2X_c-6Y_2^2X_c-K_1Y_1-K_2Y_2 = 0$$

$$3Y_1Y_2(K_2Y_1+K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c-(K_1Y_1+K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

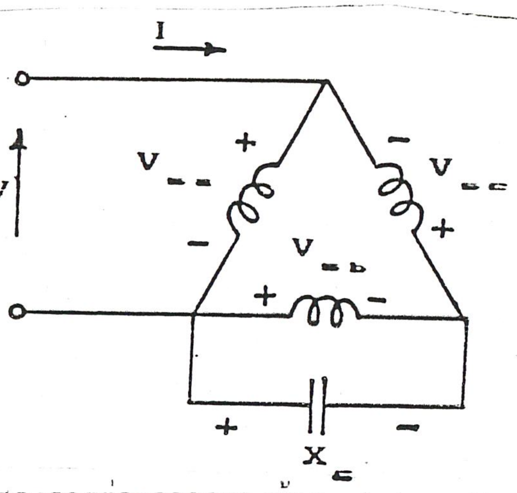
โดย $A = 3Y_1Y_2(K_2Y_1+K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = -(K_1Y_1+K_2Y_2)$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

(3.4) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ delta (แบบที่ 2) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.9 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta แบบที่ 2

$$V = V_{sa} \qquad (4.3.4.1)$$

$$V_{sc} = V_{z}$$

$$I_{z} = I_{sb} - I_{sc}$$

$$V_{sb} = -jX_{c}\ (I_{sc} - I_{sb})$$

$$V_{sb} = jX_{c}\ (I_{sb} - I_{sc}) \qquad (4.3.4.2)$$

โดย V = voltage จากแหล่งจ่ายไฟ

X_{c} = capacitive reactance

และจากความสัมพันธ์ Symmetrical Component จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{a} \\ V_{b} \\ V_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{0} \\ V_{1} \\ V_{2} \end{bmatrix}$$

ทำการแก้สมการเพื่อหาค่า V_{1}, V_{2}

จากสมการ (4.3.4.2)

$$a^{2}V_{1} + aV_{2} = jX_{c}(a^{2}V_{1}y_{1} + aV_{2}y_{2} - aV_{1}y_{1} - a^{2}V_{2}y_{2})$$

$$aV_{1} + a^{2}V_{2} = jX_{c}[(a^{2}-a)V_{1}y_{1} + (a-a^{2})V_{2}y_{2}]$$

$$= jX_c[-\sqrt{3}jV_1y_1+\sqrt{3}jV_2y_2]$$

$$aV_1+a^2V_2 = \sqrt{3}X_cV_1y_1-\sqrt{3}X_cV_2y_2$$

$$(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)V_1 = (a+\sqrt{3}X_cy_2)V_2 \qquad (4.3.4.3)$$

จัดรูปได้

$$V_1 = (a+\sqrt{3}X_cy_2)/(\sqrt{3}X_cy_1-a^2) * V_2$$

$$V_2 = (\sqrt{3}X_cy_1-a^2)/(a+\sqrt{3}X_cy_2) * V_1$$

$$V = V_{ขa} = V_1+V_2 \qquad (4.3.4.4)$$

จาก (4.3.4.3) แทน V_2 เพื่อหา V ลงใน (4.3.4.4)

$$V = V_1 + [(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)/(a+\sqrt{3}X_cy_2)] * V_1$$

$$V = [(a+\sqrt{3}X_cy_2+\sqrt{3}X_cy_1-a^2)/(a+\sqrt{3}X_cy_2)] * V_1$$

$$V_1 = [(a+\sqrt{3}X_cy_2)/(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2)] * V \qquad (*********)$$

จาก (4.3.4.4) แทน (4.3.4.3) ลงใน (4.3.4.4)

$$V = V_1 + V_2$$

$$V = [(a+\sqrt{3}X_cy_2)/(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)]* V_2 + V_2$$

$$V = [(a+\sqrt{3}X_cy_2+\sqrt{3}X_cy_1-a^2)/(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)]* V_2$$

$$V = [(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2)/(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)]* V_2$$

$$V_2 = [(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)/(\sqrt{3}j+\sqrt{3}X_c(y_1+y_2)]* V_2 \qquad (*********)$$

$$U = |V_2|/|V_1|$$

$$U = |(\sqrt{3}X_cy_1-a^2)|/|(a+\sqrt{3}X_cy_2)|$$

$$U = |(\sqrt{3}X_cy_1-(-1/2-\sqrt{3}/2j)|/|(-1/2+\sqrt{3}/2j+\sqrt{3}X_cy_2)|$$

$$U = |1/2+\sqrt{3}X_cy_1+\sqrt{3}/2j|/|-1/2+\sqrt{3}X_cy_2+\sqrt{3}/2j|$$

จัดรูป y_1, y_2 ให้อยู่ในรูปขนาดและมุม

โดย Y_1 = ขนาดของ admittance (y_1) $\quad \phi_1$ = มุมของ admittance (y_1)

Y_2 = ขนาดของ admittance (y_2) $\quad \phi_2$ = มุมของ admittance (y_2)

$$U = |1/2+\sqrt{3}X_cY_1(\cos\phi_1+j\sin\phi_1)+\sqrt{3}/2j|/|-1/2+\sqrt{3}X_cY_2(\cos\phi_2+j\sin\phi_2)+\sqrt{3}/2j|$$

$$U = [(1/2+\sqrt{3}X_c Y_1 \cos\phi_1)^2+(\sqrt{3}/2+\sqrt{3}X_c Y_1 \sin\phi_1)^2]^{1/2} / [(-1/2 +\sqrt{3}X_c Y_2 \cos\phi_2)^2 + (\sqrt{3}/2+\sqrt{3}X_c Y_2 \sin\phi_2)^2]^{1/2}$$

$$U = [1+3X_c^2 Y_1^2+X_c Y_1(\sqrt{3}\cos\phi_1+3\sin\phi_1)]^{1/2} / [1+3X_c^2 Y_2^2+X_c Y_2 (-\sqrt{3}\cos\phi_2+3\sin\phi_2]^{1/2}$$

$$U = [1+3X_c^2 Y_1^2+X_c Y_1 K_1]^{1/2} / [1+3X_c^2 Y_2^2+X_c Y_2 K_2]^{1/2}$$

โดย $K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1$

$K_2 = -\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$

โดยการหาอนุพันธ์ U เทียบกับ X_c เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่า unbalance ที่น้อยสุด (minimum unbalance) ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันกับการหาค่าประสิทธิภาพสูงสุด

$$dU/dX_c = 0$$

$$1/2*[1/(1+3X_c^2 Y_2^2+X_c Y_2 K_2)^2] * [(1+3X_c^2 Y_1^2+X_c Y_1 K_1)/(1+3X_c^2 Y_2^2+X_c Y_2 K_2)]^{-1/2} * [(1+3X_c^2 Y_2^2+X_c Y_2 K_2)(6X_c Y_1^2+Y_1 K_1)-(1+3X_c^2 Y_1^2+X_c Y_1 K_1)(6X_c^2 Y_2^2+Y_2 K_2) = 0$$

$$(1+3X_c^2 Y_2^2+X_c Y_2 K_2)(6X_c Y_1^2+Y_1 K_1) = (1+3X_c^2 Y_1^2+X_c Y_1 K_1)(6X_c^2 Y_2^2+Y_2 K_2)$$

กระจายและจัดรูป

$$3K_2 Y_2 Y_1^2 X_c^2-3K_1 Y_1 Y_2^2 X_c^2+6Y_1^2 X_c-6Y_2^2 X_c+K_1 Y_1-K_2 Y_2 = 0$$

$$3Y_1 Y_2 (K_2 Y_1-K_1 Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+(K_1 Y_1-K_2 Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = 3Y_1 Y_2(K_2 Y_1-K_1 Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

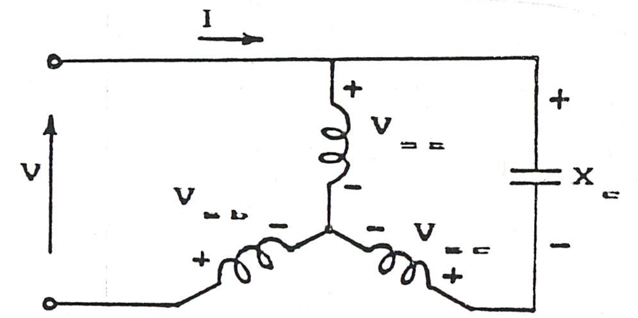
$C = K_1 Y_1-K_2 Y_2$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

<u>สรุปการคำนวณหาค่า reactance กรณีวิธีการใช้ differentiate เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุด</u>

แบ่งได้เป็น 4 วิธี ดังนี้

(3.1) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ star (แบบที่ 1) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.10 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star แบบที่ 1

$$Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+3(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

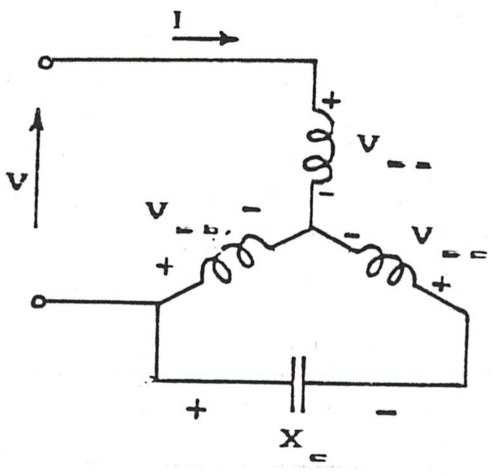
$C = 3(K_1Y_1-K_2Y_2)$

$K_1 = 3\sin\phi_1-\sqrt{3}\cos\phi_1$

$K_2 = 3\sin\phi_2+\sqrt{3}\cos\phi_2$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

(3.2) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ star (แบบที่ 2) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.11 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star แบบที่ 2

$$Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+3(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

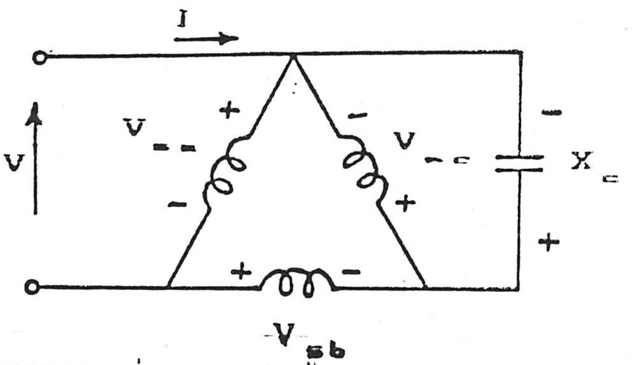
$C = 3(K_1Y_1-K_2Y_2)$

$K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1$

$K_2 = -\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

(3.3) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ delta (แบบที่ 1) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.12 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta แบบที่ 1

$$3Y_1Y_2(K_2Y_1+K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c-(K_1Y_1+K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = 3Y_1Y_2(K_2Y_1+K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

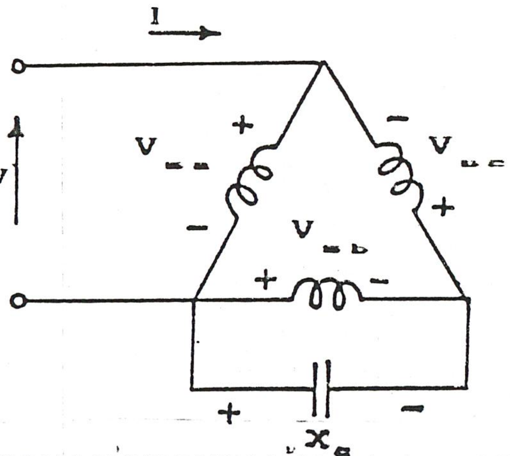
$C = -(K_1Y_1+K_2Y_2)$

$K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 - 3\sin\phi_1$

$K_2 = \sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

(3.4) พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ delta (แบบที่ 2) มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.13 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta แบบที่ 2

$$3Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = 3Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = K_1Y_1-K_2Y_2$

$K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1$

$K_2 = -\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

บทที่ 5

การทดลอง วิธีการทดลอง ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะไม่สมดุลของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดผลกระทบเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟสกล่าวคือ มอเตอร์ 3 เฟส จะไม่สามารถเริ่มหมุนได้จากการหยุดนิ่ง อีกกรณีหนึ่งคือพลังงานของมอเตอร์ชนิด 3 เฟสที่ได้จากการจ่ายไฟเฟสเดียวจะเหลือเพียงประมาณ 60 % ของแรงม้าที่กำหนดบนแผ่นป้าย (name plate) จากเหตุผลที่กล่าวมาเป็นเพียงผลกระทบบางกรณีที่ทราบโดยทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการพิจารณาสาเหตุต่างๆ เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อกับระบบไฟ 1 เฟส โดยจะศึกษาผลกระทบดังกล่าว อีกทั้งพิจารณาการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ซึ่งใช้โดยวิธีการต่อ capacitor ขนานกับขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งการหาค่าคาปาซิเตอร์นี้จะใช้วิธีการหาแบบอนุพันธ์ อันเป็นวิธีหนึ่งในการหาค่าเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานในสภาวะจริง นอกจากนี้วิธีการนี้จะพิจารณาที่ประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการทดลอง นำไปใช้งานนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 3 เฟสในกรณีการต่อขดลวดสเตเตอร์วิธีต่างๆ

5.2 ประเภทและลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสและอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการทดลอง

- NAME PLATE ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสขนาด 1 แรงม้า (HP)

1 HP	4 POLE			
HERTZ	50		FRAME	80
VOLTZ	220	380	RATING	CONT
AMP	3.5	2.0	INS CLASS	E
RPM	1410		AMB TEMP	40 C
JISC	4004		WEIGHT	15 Kg
JP	44			
JC	4		BEARING	
SERIAL	291			6204ZZ
				6203ZZ

- มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ใช้ในการทดลองเป็น ชนิด SQUIRREL CAGE CLASS A.
- รัศมีของเพลาที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส = 7.5 cm.

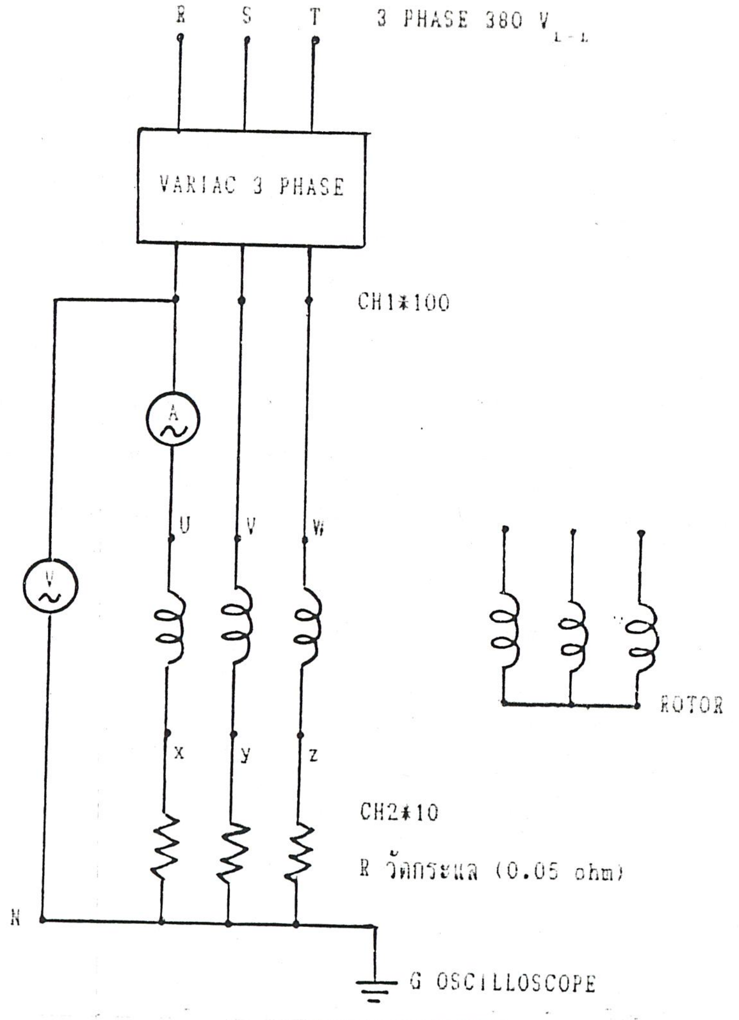
5.3 การทดลองหาความสัมพันธ์และพิจารณาเปรียบเทียบการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสและ 1 เฟส

การทดลองที่ 1 การทดลองหาค่า Parameter ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

วัตถุประสงค์

1. สามารถทดลองหาค่า Parameter ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส
2. สามารถคำนวณหาค่า Postive Sequence Impedance , Negative Sequence Impedance ได้
3. สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของค่าคาปาซิเตอร์หรือเฟสบาลานซ์เซอร์ที่ slip ต่างๆ

วงจรในการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงวงจรการทดลองหาค่า Parameter ของมอเตอร์ 3 เฟส

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.	Induction motor ขนาด 1 แรงม้า	1 ตัว
2.	variac 3 ϕ	1 ตัว
3.	AC voltmeter 0-300 V	1 ตัว
4.	AC ampmeter 0-5 A	1 ตัว
5.	DC ampmeter 0-5 A	1 ตัว
6.	variac 1 ϕ	1 ตัว
7.	1 ϕ bridge rectifier	1 ชุด
8.	multimeter	1 ตัว
9.	junction box	2 ชุด
10.	wire	30 เส้น
11.	resistor สำหรับวัดกระแส	1 ชุด
12.	oscilloscope (พร้อม probe 2 เส้น)	1 ชุด

วิธีการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูป
2. ป้อนไฟเข้ามอเตอร์ที่พิกัดศักดาไฟฟ้า (rated voltage) บันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, และ มุมเพาเวอร์แฟกเตอร์ (โดยดูจาก oscilloscope)
3. ทำการจับ rotor ของ induction motor ให้หยุดนิ่ง แล้วค่อย ๆ ทำการปรับไฟป้อนเข้าตั้งแต่ 0 V จนกระแสที่อ่านได้ถึงค่าพิกัดกระแส (rated current) ทำการบันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้า,และมุมเพาเวอร์แฟกเตอร์
4. ทำ VI method วัดค่า stator resistance และ คำนวณหาค่า rotor resistance

บันทึกผลการทดลอง

ทำการ lock rotor test วัดค่าได้ดังนี้

I_b = 2 A/phase

V_b = 54 V/phase

θ_b = 63 degree

ทำการ open circuit test วัดค่าได้ดังนี้

I_o = 1.2 A/phase

V_o = 220 V/phase

θ_o = 84.6 degree

ใช้ VI - method ได้ค่าดังตาราง

voltage (v)	current (A)
5	0.55
10	1.09
15	1.63

การคำนวณหาค่า parameter ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

ขณะ open circuit test

$I_{\phi} = I_o = 1.2$ A/phase

$\theta_o = 84.6$ degree

$I_c = I_o \cos\theta_o = 1.2*\cos 84.6^{\circ} = 0.113$ A

$I_m = I_o \sin\theta_o = 1.2*\sin 84.6^{\circ} = 1.195$ A

$R_c = V_o / I_c = 220/0.113 = 1948.62$ ohm

$X_m = V_o / I_m = 220/1.195 = 184.15$ ohm

ขณะ lock rotor test

$Z_b = V_b \angle 0^{\circ} \;/\; I_b \angle -\theta_b^{\circ} = 54 \angle 0^{\circ} \;/\; 2 \angle -63^{\circ}$

$= 12.26 + j24.05$

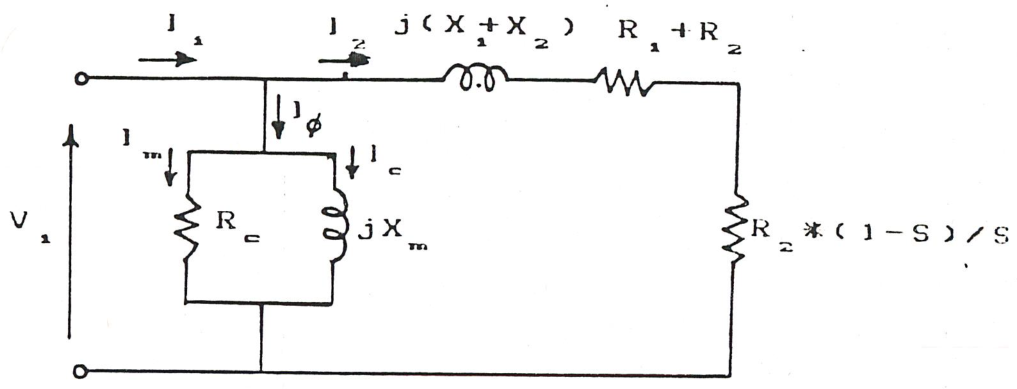
$R_{eq} = 12.26$ ohm

$X_{eq} = 24.05$ ohm

จากการทำ VI method จะได้ค่า R stator มีค่าเท่ากับ 9.15 ohm

$R_{eq} = R_{stator} + R_{rotor}$

$R_{rotor} = 12.26 - 9.15 = 3.11$ ohm



รูปที่ 2 แสดง Approximate equivalent circuit of three phase induction motor

การคำนวณหาค่า Positive and Negative Sequence Impedance

จากผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่า - Postive Sequence Impedance

- Negative Sequence Impedance

จากการทดลอง

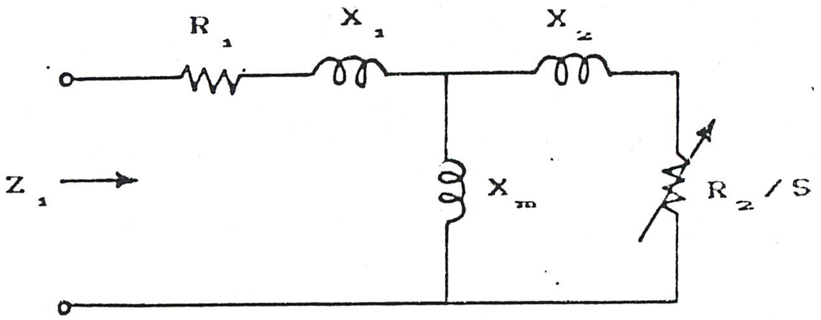
R_c = 1948.62 ohm X_m = 184.15 ohm

$X_1 = X_2$ = 24.05/2 = 12.025 ohm

$R_{stator} = R_1$ = 9.15 ohm

$R_{rotor} = R_2$ = 3.11 ohm

การหาค่า Z_1



รูปที่ 3 แสดงการหาค่า Positive Sequence Impedance ของมอเตอร์

$$Z_1 = (R_1+jX_1)+[(jX_m)(R_2/S+jX_2)]/[R_2/S+j(X_2+X_m)]$$

$$Z_1 = (9.15+j12.03)+\frac{(j184.15)((3.11/S)+j12.03)}{(3.11/S)+j(12.03+184.15)}$$

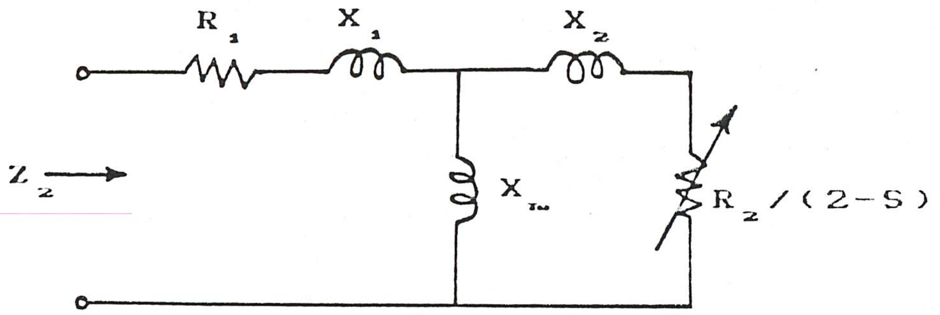
$$Z_1 = (9.15+j12.03)+\frac{(-2215.32)+j(572.71/S)}{(3.11/S)+j(196.18)}$$

$$Z_1 = (9.15+j12.03)+\frac{(-2215.32+j572.71/S)(3.11/S-j196.18)}{(9.67/S^2)+38486.59}$$

$$Z_1 = (9.15+j12.03)+\frac{[(105464.6/S)+j(434601.48+(1781.13/S^2))]}{(9.67/S^2)+38486.59}$$

$$Z_1 = (9.15+\frac{(105464.6/S)}{(9.67/S^2)+38486.59})+j(12.03+\frac{[(434601.48)+(1781.13/S^2)]}{(9.67/S^2)+38486.59})$$

<u>การหาค่า Z_2</u>



รูปที่ 4 แสดงการหาค่า Negative Sequence Impedance ของมอเตอร์

$$Z_2 = (R_1+jX_1)+[(jX_m)(R_2/(2-S)+jX_2)]/[R_2/(2-S)+j(X_2+X_m)]$$

$$Z_2 = (9.15+j12.03)+\frac{(j184.15)((3.11/(2-S))+j12.03)}{(3.11/(2-S))+j(12.03+184.15)}$$

$$Z_2 = (9.15+j12.03)+\frac{(-2215.32)+j(572.71/(2-S))}{(3.11/(2-S))+j(196.18)}$$

$$Z_2 = (9.15+j12.03)+\frac{(-2215.32+j572.71/(2-S))(3.11/(2-S)-j196.18)}{(9.67/(2-S)^2)+38486.59}$$

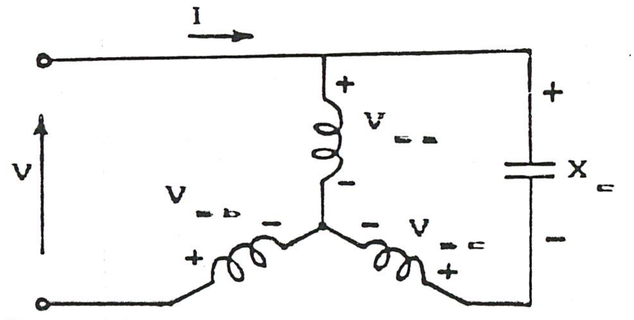
$$Z_2 =(9.15+j12.03)+\frac{[(105464.6/(2-S))+j(434601.48+(1781.13/(2-S)^2))]}{(9.67/(2-S)^2)+38486.59}$$

$$Z_2 = \left(9.15 + \frac{(105464.6/(2-S))}{(9.67/(2-S)^2)+38486.59}\right)$$

$$+j\left(12.03 + \frac{[(434601.48)+(1781.13/(2-S)^2)]}{(9.67/(2-S)^2)+38486.59}\right)$$

การคำนวณหาค่า reactance กรณีวิธีการใช้ differentiate เพื่อหาค่าที่ทำให้การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส มีประสิทธิภาพสูงสุด แบ่งได้เป็น 4 วิธี (วิธีการที่ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษา) ดังนี้

- พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ star (แบบที่ 1)



รูปที่ 5 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star แบบที่ 1

$Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+3(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$

$AX_c^2 + BX_c + C = 0$

โดย $A = Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = 3(K_1Y_1-K_2Y_2)$

Y_1 = ขนาดของ Positive Sequence Admittance

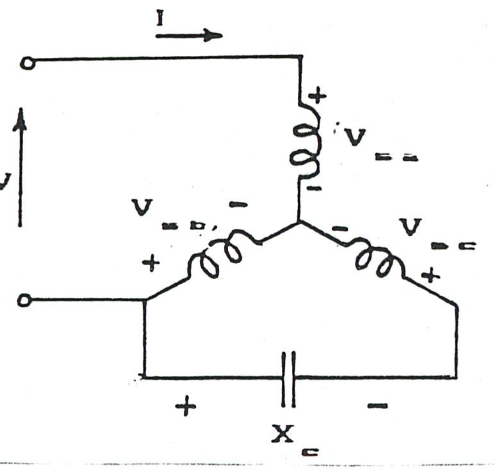
Y_2 = ขนาดของ Negative Sequence Admittance

$K_1 = 3\sin\phi_1-\sqrt{3}\cos\phi_1$; ϕ_1 = มุมของ Positive Sequence Admittance

$K_2 = 3\sin\phi_2+\sqrt{3}\cos\phi_2$; ϕ_2 = มุมของ Negative Sequence Admittance

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

- พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ star (แบบที่ 2)



รูปที่ 6 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star แบบที่ 2

$$Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+3(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = 3(K_1Y_1-K_2Y_2)$

Y_1 = ขนาดของ Positive Sequence Admittance

Y_2 = ขนาดของ Negative Sequence Admittance

$K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1$; ϕ_1 = มุมของ Positive Sequence Admittance

$K_2 = -\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$; ϕ_2 = มุมของ Negative Sequence Admittance

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

จากกรณีการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ star ทั้ง 2 กรณี สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า slip กับ ขนาด capacitor ได้โดยการเขียนโปรแกรม lotus ดังนี้

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0001	8.195	142.587	7.440	72.217
0.0002	8.220	142.661	7.403	72.216
0.0003	8.245	142.736	7.367	72.216
0.0004	8.270	142.811	7.331	72.215
0.0005	8.295	142.886	7.294	72.214
0.0006	8.319	142.961	7.258	72.214
0.0007	8.344	143.036	7.221	72.213
0.0008	8.369	143.112	7.185	72.213
0.0009	8.394	143.188	7.149	72.212
0.0010	8.419	143.264	7.113	72.212
0.0011	8.444	143.340	7.076	72.211
0.0012	8.469	143.416	7.040	72.211
0.0013	8.494	143.492	7.004	72.210
0.0014	8.519	143.569	6.968	72.209
0.0015	8.544	143.646	6.932	72.209
0.0016	8.569	143.723	6.896	72.208
0.0017	8.594	143.800	6.860	72.208
0.0018	8.619	143.877	6.824	72.207
0.0019	8.644	143.955	6.788	72.207
0.0020	8.670	144.033	6.752	72.206
0.0021	8.695	144.111	6.716	72.206
0.0022	8.720	144.189	6.680	72.205
0.0023	8.745	144.267	6.644	72.205
0.0024	8.770	144.346	6.608	72.204
0.0025	8.796	144.424	6.572	72.203
0.0026	8.821	144.503	6.536	72.203
0.0027	8.846	144.582	6.500	72.202
0.0028	8.872	144.661	6.465	72.202
0.0029	8.897	144.741	6.429	72.201
0.0030	8.922	144.820	6.393	72.201
0.0031	8.948	144.900	6.357	72.200
0.0032	8.973	144.980	6.322	72.200
0.0033	8.999	145.060	6.286	72.199
0.0034	9.024	145.141	6.250	72.199
0.0035	9.049	145.221	6.215	72.198
0.0036	9.075	145.302	6.179	72.198
0.0037	9.100	145.383	6.144	72.197
0.0038	9.126	145.464	6.108	72.196
0.0039	9.152	145.545	6.073	72.196
0.0040	9.177	145.627	6.037	72.195
0.0041	9.203	145.709	6.002	72.195
0.0042	9.228	145.791	5.966	72.194
0.0043	9.254	145.873	5.931	72.194
0.0044	9.280	145.955	5.895	72.193
0.0045	9.305	146.037	5.860	72.193
0.0046	9.331	146.120	5.825	72.192
0.0047	9.357	146.203	5.789	72.192
0.0048	9.382	146.286	5.754	72.191

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0049	9.408	146.369	5.719	72.191
0.0050	9.434	146.453	5.684	72.190
0.0051	9.460	146.537	5.648	72.190
0.0052	9.486	146.620	5.613	72.189
0.0053	9.511	146.705	5.578	72.189
0.0054	9.537	146.789	5.543	72.188
0.0055	9.563	146.873	5.508	72.188
0.0056	9.589	146.958	5.473	72.187
0.0057	9.615	147.043	5.438	72.187
0.0058	9.641	147.128	5.403	72.186
0.0059	9.667	147.213	5.368	72.186
0.0060	9.693	147.299	5.333	72.185
0.0061	9.719	147.385	5.298	72.185
0.0062	9.745	147.471	5.263	72.184
0.0063	9.771	147.557	5.228	72.183
0.0064	9.797	147.643	5.193	72.183
0.0065	9.823	147.730	5.158	72.182
0.0066	9.849	147.816	5.123	72.182
0.0067	9.875	147.903	5.088	72.181
0.0068	9.902	147.990	5.054	72.181
0.0069	9.928	148.078	5.019	72.180
0.0070	9.954	148.165	4.984	72.180
0.0071	9.980	148.253	4.949	72.179
0.0072	10.006	148.341	4.915	72.179
0.0073	10.033	148.429	4.880	72.178
0.0074	10.059	148.518	4.845	72.178
0.0075	10.085	148.606	4.811	72.177
0.0076	10.111	148.695	4.776	72.177
0.0077	10.138	148.784	4.742	72.176
0.0078	10.164	148.874	4.707	72.176
0.0079	10.190	148.963	4.673	72.175
0.0080	10.217	149.053	4.638	72.175
0.0081	10.243	149.143	4.604	72.174
0.0082	10.270	149.233	4.569	72.174
0.0083	10.296	149.323	4.535	72.173
0.0084	10.322	149.414	4.500	72.173
0.0085	10.349	149.505	4.466	72.172
0.0086	10.375	149.596	4.432	72.172
0.0087	10.402	149.687	4.397	72.171
0.0088	10.429	149.779	4.363	72.171
0.0089	10.455	149.870	4.329	72.170
0.0090	10.482	149.962	4.295	72.170
0.0091	10.508	150.054	4.260	72.169
0.0092	10.535	150.147	4.226	72.169
0.0093	10.561	150.239	4.192	72.168
0.0094	10.588	150.332	4.158	72.168
0.0095	10.615	150.425	4.124	72.167
0.0096	10.641	150.518	4.090	72.167

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0097	10.668	150.612	4.055	72.167
0.0098	10.695	150.706	4.021	72.166
0.0099	10.722	150.800	3.987	72.166
0.0100	10.748	150.894	3.953	72.165
0.0101	10.775	150.988	3.919	72.165
0.0102	10.802	151.083	3.885	72.164
0.0103	10.829	151.178	3.851	72.164
0.0104	10.856	151.273	3.818	72.163
0.0105	10.883	151.368	3.784	72.163
0.0106	10.909	151.464	3.750	72.162
0.0107	10.936	151.560	3.716	72.162
0.0108	10.963	151.656	3.682	72.161
0.0109	10.990	151.752	3.648	72.161
0.0110	11.017	151.848	3.615	72.160
0.0111	11.044	151.945	3.581	72.160
0.0112	11.071	152.042	3.547	72.159
0.0113	11.098	152.139	3.513	72.159
0.0114	11.125	152.237	3.480	72.158
0.0115	11.152	152.335	3.446	72.158
0.0116	11.179	152.433	3.412	72.157
0.0117	11.206	152.531	3.379	72.157
0.0118	11.233	152.629	3.345	72.156
0.0119	11.260	152.728	3.312	72.156
0.0120	11.288	152.827	3.278	72.156
0.0121	11.315	152.926	3.245	72.155
0.0122	11.342	153.025	3.211	72.155
0.0123	11.369	153.125	3.178	72.154
0.0124	11.396	153.225	3.144	72.154
0.0125	11.424	153.325	3.111	72.153
0.0126	11.451	153.425	3.077	72.153
0.0127	11.478	153.526	3.044	72.152
0.0128	11.505	153.627	3.011	72.152
0.0129	11.533	153.728	2.977	72.151
0.0130	11.560	153.829	2.944	72.151
0.0131	11.587	153.931	2.911	72.150
0.0132	11.615	154.033	2.878	72.150
0.0133	11.642	154.135	2.844	72.149
0.0134	11.669	154.237	2.811	72.149
0.0135	11.697	154.340	2.778	72.149
0.0136	11.724	154.443	2.745	72.148
0.0137	11.752	154.546	2.712	72.148
0.0138	11.779	154.649	2.679	72.147
0.0139	11.807	154.753	2.645	72.147
0.0140	11.834	154.857	2.612	72.146
0.0141	11.862	154.961	2.579	72.146
0.0142	11.889	155.066	2.546	72.145
0.0143	11.917	155.170	2.513	72.145
0.0144	11.944	155.275	2.480	72.144

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0145	11.972	155.380	2.447	72.144
0.0146	11.999	155.486	2.415	72.143
0.0147	12.027	155.592	2.382	72.143
0.0148	12.055	155.698	2.349	72.143
0.0149	12.082	155.804	2.316	72.142
0.0150	12.110	155.910	2.283	72.142
0.0151	12.138	156.017	2.250	72.141
0.0152	12.165	156.124	2.217	72.141
0.0153	12.193	156.232	2.185	72.140
0.0154	12.221	156.339	2.152	72.140
0.0155	12.249	156.447	2.119	72.139
0.0156	12.276	156.555	2.087	72.139
0.0157	12.304	156.664	2.054	72.139
0.0158	12.332	156.772	2.021	72.138
0.0159	12.360	156.881	1.989	72.138
0.0160	12.388	156.991	1.956	72.137
0.0161	12.415	157.100	1.923	72.137
0.0162	12.443	157.210	1.891	72.136
0.0163	12.471	157.320	1.858	72.136
0.0164	12.499	157.430	1.826	72.135
0.0165	12.527	157.541	1.793	72.135
0.0166	12.555	157.652	1.761	72.134
0.0167	12.583	157.763	1.728	72.134
0.0168	12.611	157.874	1.696	72.134
0.0169	12.639	157.986	1.664	72.133
0.0170	12.667	158.098	1.631	72.133
0.0171	12.695	158.210	1.599	72.132
0.0172	12.723	158.323	1.566	72.132
0.0173	12.751	158.436	1.534	72.131
0.0174	12.779	158.549	1.502	72.131
0.0175	12.807	158.662	1.470	72.131
0.0176	12.835	158.776	1.437	72.130
0.0177	12.863	158.890	1.405	72.130
0.0178	12.892	159.005	1.373	72.129
0.0179	12.920	159.119	1.341	72.129
0.0180	12.948	159.234	1.309	72.128
0.0181	12.976	159.349	1.276	72.128
0.0182	13.004	159.465	1.244	72.127
0.0183	13.032	159.580	1.212	72.127
0.0184	13.061	159.696	1.180	72.127
0.0185	13.089	159.813	1.148	72.126
0.0186	13.117	159.929	1.116	72.126
0.0187	13.146	160.046	1.084	72.125
0.0188	13.174	160.164	1.052	72.125
0.0189	13.202	160.281	1.020	72.124
0.0190	13.230	160.399	0.988	72.124
0.0191	13.259	160.517	0.956	72.124
0.0192	13.287	160.636	0.924	72.123

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0193	13.316	160.754	0.893	72.123
0.0194	13.344	160.873	0.861	72.122
0.0195	13.372	160.993	0.829	72.122
0.0196	13.401	161.112	0.797	72.121
0.0197	13.429	161.232	0.765	72.121
0.0198	13.458	161.353	0.734	72.121
0.0199	13.486	161.473	0.702	72.120
0.0200	13.515	161.594	0.670	72.120
0.0201	13.543	161.715	0.639	72.119
0.0202	13.572	161.837	0.607	72.119
0.0203	13.600	161.959	0.575	72.118
0.0204	13.629	162.081	0.544	72.118
0.0205	13.657	162.203	0.512	72.118
0.0206	13.686	162.326	0.480	72.117
0.0207	13.714	162.449	0.449	72.117
0.0208	13.743	162.573	0.417	72.116
0.0209	13.772	162.696	0.386	72.116
0.0210	13.800	162.820	0.354	72.116
0.0211	13.829	162.945	0.323	72.115
0.0212	13.858	163.069	0.291	72.115
0.0213	13.886	163.195	0.260	72.114
0.0214	13.915	163.320	0.229	72.114
0.0215	13.944	163.446	0.197	72.113
0.0216	13.973	163.571	0.166	72.113
0.0217	14.001	163.698	0.134	72.113
0.0218	14.030	163.824	0.103	72.112
0.0219	14.059	163.951	0.072	72.112
0.0220	14.088	164.079	0.041	72.111
0.0221	14.116	164.206	0.009	72.111
0.0222	14.145	164.334	-0.022	72.111
0.0223	14.174	164.463	-0.053	72.110
0.0224	14.203	164.591	-0.084	72.110
0.0225	14.232	164.720	-0.115	72.109
0.0226	14.261	164.850	-0.147	72.109
0.0227	14.290	164.979	-0.178	72.108
0.0228	14.318	165.109	-0.209	72.108
0.0229	14.347	165.239	-0.240	72.108
0.0230	14.376	165.370	-0.271	72.107
0.0231	14.405	165.501	-0.302	72.107
0.0232	14.434	165.633	-0.333	72.106
0.0233	14.463	165.764	-0.364	72.106
0.0234	14.492	165.896	-0.395	72.106
0.0235	14.521	166.029	-0.426	72.105
0.0236	14.550	166.161	-0.457	72.105
0.0237	14.579	166.294	-0.488	72.104
0.0238	14.608	166.428	-0.519	72.104
0.0239	14.637	166.562	-0.549	72.104
0.0240	14.666	166.696	-0.580	72.103

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0241	14.696	166.830	-0.611	72.103
0.0242	14.725	166.965	-0.642	72.102
0.0243	14.754	167.100	-0.673	72.102
0.0244	14.783	167.236	-0.703	72.102
0.0245	14.812	167.372	-0.734	72.101
0.0246	14.841	167.508	-0.765	72.101
0.0247	14.870	167.645	-0.796	72.100
0.0248	14.900	167.782	-0.826	72.100
0.0249	14.929	167.919	-0.857	72.100
0.0250	14.958	168.057	-0.888	72.099
0.0251	14.987	168.195	-0.918	72.099
0.0252	15.016	168.333	-0.949	72.098
0.0253	15.046	168.472	-0.979	72.098
0.0254	15.075	168.611	-1.010	72.098
0.0255	15.104	168.751	-1.040	72.097
0.0256	15.134	168.891	-1.071	72.097
0.0257	15.163	169.031	-1.101	72.096
0.0258	15.192	169.172	-1.132	72.096
0.0259	15.221	169.313	-1.162	72.096
0.0260	15.251	169.454	-1.193	72.095
0.0261	15.280	169.596	-1.223	72.095
0.0262	15.310	169.738	-1.253	72.094
0.0263	15.339	169.881	-1.284	72.094
0.0264	15.368	170.024	-1.314	72.094
0.0265	15.398	170.167	-1.344	72.093
0.0266	15.427	170.311	-1.375	72.093
0.0267	15.457	170.455	-1.405	72.092
0.0268	15.486	170.600	-1.435	72.092
0.0269	15.516	170.744	-1.465	72.092
0.0270	15.545	170.890	-1.496	72.091
0.0271	15.575	171.035	-1.526	72.091
0.0272	15.604	171.181	-1.556	72.091
0.0273	15.634	171.328	-1.586	72.090
0.0274	15.663	171.475	-1.616	72.090
0.0275	15.693	171.622	-1.646	72.089
0.0276	15.722	171.770	-1.677	72.089
0.0277	15.752	171.918	-1.707	72.089
0.0278	15.781	172.066	-1.737	72.088
0.0279	15.811	172.215	-1.767	72.088
0.0280	15.840	172.364	-1.797	72.087
0.0281	15.870	172.514	-1.827	72.087
0.0282	15.900	172.664	-1.857	72.087
0.0283	15.929	172.814	-1.887	72.086
0.0284	15.959	172.965	-1.916	72.086
0.0285	15.989	173.116	-1.946	72.086
0.0286	16.018	173.268	-1.976	72.085
0.0287	16.048	173.420	-2.006	72.085
0.0288	16.078	173.573	-2.036	72.084

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0289	16.107	173.726	-2.066	72.084
0.0290	16.137	173.879	-2.096	72.084
0.0291	16.167	174.033	-2.125	72.083
0.0292	16.197	174.187	-2.155	72.083
0.0293	16.226	174.341	-2.185	72.082
0.0294	16.256	174.496	-2.215	72.082
0.0295	16.286	174.652	-2.244	72.082
0.0296	16.316	174.808	-2.274	72.081
0.0297	16.346	174.964	-2.304	72.081
0.0298	16.375	175.121	-2.333	72.081
0.0299	16.405	175.278	-2.363	72.080
0.0300	16.435	175.436	-2.392	72.080
0.0301	16.465	175.594	-2.422	72.079
0.0302	16.495	175.752	-2.452	72.079
0.0303	16.525	175.911	-2.481	72.079
0.0304	16.554	176.070	-2.511	72.078
0.0305	16.584	176.230	-2.540	72.078
0.0306	16.614	176.390	-2.570	72.078
0.0307	16.644	176.551	-2.599	72.077
0.0308	16.674	176.712	-2.628	72.077
0.0309	16.704	176.874	-2.658	72.076
0.0310	16.734	177.036	-2.687	72.076
0.0311	16.764	177.198	-2.717	72.076
0.0312	16.794	177.361	-2.746	72.075
0.0313	16.824	177.524	-2.775	72.075
0.0314	16.854	177.688	-2.805	72.075
0.0315	16.884	177.852	-2.834	72.074
0.0316	16.914	178.017	-2.863	72.074
0.0317	16.944	178.182	-2.892	72.073
0.0318	16.974	178.348	-2.922	72.073
0.0319	17.004	178.514	-2.951	72.073
0.0320	17.034	178.680	-2.980	72.072
0.0321	17.064	178.847	-3.009	72.072
0.0322	17.094	179.015	-3.038	72.072
0.0323	17.124	179.183	-3.067	72.071
0.0324	17.154	179.351	-3.097	72.071
0.0325	17.185	179.520	-3.126	72.071
0.0326	17.215	179.690	-3.155	72.070
0.0327	17.245	179.859	-3.184	72.070
0.0328	17.275	180.030	-3.213	72.069
0.0329	17.305	180.200	-3.242	72.069
0.0330	17.335	180.372	-3.271	72.069
0.0331	17.365	180.544	-3.300	72.068
0.0332	17.396	180.716	-3.329	72.068
0.0333	17.426	180.888	-3.358	72.068
0.0334	17.456	181.062	-3.387	72.067
0.0335	17.486	181.235	-3.416	72.067
0.0336	17.516	181.410	-3.444	72.067

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0337	17.547	181.584	-3.473	72.066
0.0338	17.577	181.759	-3.502	72.066
0.0339	17.607	181.935	-3.531	72.065
0.0340	17.637	182.111	-3.560	72.065
0.0341	17.668	182.288	-3.589	72.065
0.0342	17.698	182.465	-3.617	72.064
0.0343	17.728	182.643	-3.646	72.064
0.0344	17.758	182.821	-3.675	72.064
0.0345	17.789	183.000	-3.703	72.063
0.0346	17.819	183.179	-3.732	72.063
0.0347	17.849	183.359	-3.761	72.063
0.0348	17.880	183.539	-3.789	72.062
0.0349	17.910	183.719	-3.818	72.062
0.0350	17.940	183.901	-3.847	72.062
0.0351	17.971	184.082	-3.875	72.061
0.0352	18.001	184.265	-3.904	72.061
0.0353	18.032	184.448	-3.932	72.060
0.0354	18.062	184.631	-3.961	72.060
0.0355	18.092	184.815	-3.989	72.060
0.0356	18.123	184.999	-4.018	72.059
0.0357	18.153	185.184	-4.046	72.059
0.0358	18.184	185.369	-4.075	72.059
0.0359	18.214	185.555	-4.103	72.058
0.0360	18.244	185.742	-4.132	72.058
0.0361	18.275	185.929	-4.160	72.058
0.0362	18.305	186.117	-4.188	72.057
0.0363	18.336	186.305	-4.217	72.057
0.0364	18.366	186.493	-4.245	72.057
0.0365	18.397	186.683	-4.273	72.056
0.0366	18.427	186.872	-4.302	72.056
0.0367	18.458	187.063	-4.330	72.056
0.0368	18.488	187.254	-4.358	72.055
0.0369	18.519	187.445	-4.386	72.055
0.0370	18.549	187.637	-4.415	72.054
0.0371	18.580	187.829	-4.443	72.054
0.0372	18.610	188.023	-4.471	72.054
0.0373	18.641	188.216	-4.499	72.053
0.0374	18.671	188.410	-4.527	72.053
0.0375	18.702	188.605	-4.555	72.053
0.0376	18.732	188.801	-4.584	72.052
0.0377	18.763	188.997	-4.612	72.052
0.0378	18.794	189.193	-4.640	72.052
0.0379	18.824	189.390	-4.668	72.051
0.0380	18.855	189.588	-4.696	72.051
0.0381	18.885	189.786	-4.724	72.051
0.0382	18.916	189.985	-4.752	72.050
0.0383	18.947	190.184	-4.780	72.050
0.0384	18.977	190.384	-4.808	72.050

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0385	19.008	190.585	-4.836	72.049
0.0386	19.039	190.786	-4.864	72.049
0.0387	19.069	190.988	-4.891	72.049
0.0388	19.100	191.190	-4.919	72.048
0.0389	19.131	191.393	-4.947	72.048
0.0390	19.161	191.596	-4.975	72.048
0.0391	19.192	191.801	-5.003	72.047
0.0392	19.223	192.005	-5.031	72.047
0.0393	19.253	192.211	-5.058	72.047
0.0394	19.284	192.417	-5.086	72.046
0.0395	19.315	192.623	-5.114	72.046
0.0396	19.345	192.830	-5.142	72.046
0.0397	19.376	193.038	-5.169	72.045
0.0398	19.407	193.247	-5.197	72.045
0.0399	19.438	193.456	-5.225	72.045
0.0400	19.468	193.665	-5.252	72.044
0.0401	19.499	193.876	-5.280	72.044
0.0402	19.530	194.087	-5.308	72.043
0.0403	19.561	194.298	-5.335	72.043
0.0404	19.591	194.510	-5.363	72.043
0.0405	19.622	194.723	-5.390	72.042
0.0406	19.653	194.937	-5.418	72.042
0.0407	19.684	195.151	-5.446	72.042
0.0408	19.714	195.365	-5.473	72.041
0.0409	19.745	195.581	-5.501	72.041
0.0410	19.776	195.797	-5.528	72.041
0.0411	19.807	196.013	-5.555	72.040
0.0412	19.838	196.231	-5.583	72.040
0.0413	19.868	196.449	-5.610	72.040
0.0414	19.899	196.667	-5.638	72.039
0.0415	19.930	196.887	-5.665	72.039
0.0416	19.961	197.107	-5.692	72.039
0.0417	19.992	197.327	-5.720	72.038
0.0418	20.023	197.549	-5.747	72.038
0.0419	20.053	197.771	-5.774	72.038
0.0420	20.084	197.993	-5.802	72.037
0.0421	20.115	198.217	-5.829	72.037
0.0422	20.146	198.441	-5.856	72.037
0.0423	20.177	198.665	-5.883	72.036
0.0424	20.208	198.891	-5.911	72.036
0.0425	20.239	199.117	-5.938	72.036
0.0426	20.270	199.343	-5.965	72.035
0.0427	20.300	199.571	-5.992	72.035
0.0428	20.331	199.799	-6.019	72.035
0.0429	20.362	200.028	-6.046	72.035
0.0430	20.393	200.257	-6.074	72.034
0.0431	20.424	200.488	-6.101	72.034
0.0432	20.455	200.719	-6.128	72.034

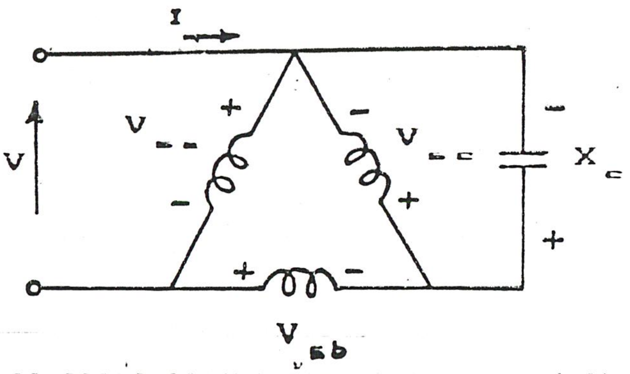
SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0433	20.486	200.950	-6.155	72.033
0.0434	20.517	201.183	-6.182	72.033
0.0435	20.548	201.416	-6.209	72.033
0.0436	20.579	201.649	-6.236	72.032
0.0437	20.610	201.884	-6.263	72.032
0.0438	20.641	202.119	-6.290	72.032
0.0439	20.672	202.355	-6.317	72.031
0.0440	20.702	202.592	-6.344	72.031
0.0441	20.733	202.829	-6.371	72.031
0.0442	20.764	203.068	-6.397	72.030
0.0443	20.795	203.306	-6.424	72.030
0.0444	20.826	203.546	-6.451	72.030
0.0445	20.857	203.786	-6.478	72.029
0.0446	20.888	204.028	-6.505	72.029
0.0447	20.919	204.270	-6.532	72.029
0.0448	20.950	204.512	-6.558	72.028
0.0449	20.981	204.756	-6.585	72.028
0.0450	21.012	205.000	-6.612	72.028
0.0451	21.043	205.245	-6.639	72.027
0.0452	21.074	205.490	-6.665	72.027
0.0453	21.105	205.737	-6.692	72.027
0.0454	21.136	205.984	-6.719	72.026
0.0455	21.167	206.232	-6.745	72.026
0.0456	21.198	206.481	-6.772	72.026
0.0457	21.229	206.731	-6.799	72.025
0.0458	21.260	206.981	-6.825	72.025
0.0459	21.291	207.232	-6.852	72.025
0.0460	21.322	207.484	-6.878	72.024
0.0461	21.353	207.737	-6.905	72.024
0.0462	21.384	207.990	-6.932	72.024
0.0463	21.416	208.245	-6.958	72.024
0.0464	21.447	208.500	-6.985	72.023
0.0465	21.478	208.756	-7.011	72.023
0.0466	21.509	209.013	-7.038	72.023
0.0467	21.540	209.270	-7.064	72.022
0.0468	21.571	209.529	-7.090	72.022
0.0469	21.602	209.788	-7.117	72.022
0.0470	21.633	210.048	-7.143	72.021
0.0471	21.664	210.309	-7.170	72.021
0.0472	21.695	210.570	-7.196	72.021
0.0473	21.726	210.833	-7.222	72.020
0.0474	21.757	211.096	-7.249	72.020
0.0475	21.788	211.361	-7.275	72.020
0.0476	21.819	211.626	-7.301	72.019
0.0477	21.850	211.892	-7.327	72.019
0.0478	21.881	212.159	-7.354	72.019
0.0479	21.913	212.426	-7.380	72.018
0.0480	21.944	212.695	-7.406	72.018

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0481	21.975	212.964	-7.432	72.018
0.0482	22.006	213.234	-7.459	72.018
0.0483	22.037	213.506	-7.485	72.017
0.0484	22.068	213.778	-7.511	72.017
0.0485	22.099	214.050	-7.537	72.017
0.0486	22.130	214.324	-7.563	72.016
0.0487	22.161	214.599	-7.589	72.016
0.0488	22.192	214.874	-7.615	72.016
0.0489	22.224	215.151	-7.641	72.015
0.0490	22.255	215.428	-7.667	72.015
0.0491	22.286	215.706	-7.694	72.015
0.0492	22.317	215.986	-7.720	72.014
0.0493	22.348	216.266	-7.746	72.014
0.0494	22.379	216.547	-7.772	72.014
0.0495	22.410	216.829	-7.797	72.014
0.0496	22.441	217.111	-7.823	72.013
0.0497	22.472	217.395	-7.849	72.013
0.0498	22.504	217.680	-7.875	72.013
0.0499	22.535	217.966	-7.901	72.012
0.0500	22.566	218.252	-7.927	72.012
0.0501	22.597	218.540	-7.953	72.012
0.0502	22.628	218.828	-7.979	72.011
0.0503	22.659	219.118	-8.005	72.011
0.0504	22.690	219.408	-8.030	72.011
0.0505	22.721	219.699	-8.056	72.010
0.0506	22.752	219.992	-8.082	72.010
0.0507	22.784	220.285	-8.108	72.010
0.0508	22.815	220.579	-8.134	72.010
0.0509	22.846	220.874	-8.159	72.009
0.0510	22.877	221.171	-8.185	72.009
0.0511	22.908	221.468	-8.211	72.009
0.0512	22.939	221.766	-8.236	72.008
0.0513	22.970	222.065	-8.262	72.008
0.0514	23.002	222.365	-8.288	72.008
0.0515	23.033	222.667	-8.313	72.007
0.0516	23.064	222.969	-8.339	72.007
0.0517	23.095	223.272	-8.364	72.007
0.0518	23.126	223.576	-8.390	72.006
0.0519	23.157	223.881	-8.416	72.006
0.0520	23.188	224.188	-8.441	72.006
0.0521	23.219	224.495	-8.467	72.006
0.0522	23.251	224.803	-8.492	72.005
0.0523	23.282	225.113	-8.518	72.005
0.0524	23.313	225.423	-8.543	72.005
0.0525	23.344	225.735	-8.569	72.004
0.0526	23.375	226.047	-8.594	72.004
0.0527	23.406	226.361	-8.619	72.004
0.0528	23.437	226.676	-8.645	72.003

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0529	23.468	226.991	-8.670	72.003
0.0530	23.500	227.308	-8.696	72.003
0.0531	23.531	227.626	-8.721	72.003
0.0532	23.562	227.945	-8.746	72.002
0.0533	23.593	228.265	-8.772	72.002
0.0534	23.624	228.586	-8.797	72.002
0.0535	23.655	228.909	-8.822	72.001
0.0536	23.686	229.232	-8.848	72.001
0.0537	23.717	229.556	-8.873	72.001
0.0538	23.749	229.882	-8.898	72.000
0.0539	23.780	230.209	-8.923	72.000
0.0540	23.811	230.537	-8.949	72.000
0.0541	23.842	230.866	-8.974	72.000
0.0542	23.873	231.196	-8.999	71.999
0.0543	23.904	231.527	-9.024	71.999
0.0544	23.935	231.859	-9.049	71.999
0.0545	23.966	232.193	-9.074	71.998
0.0546	23.997	232.528	-9.099	71.998
0.0547	24.029	232.864	-9.125	71.998
0.0548	24.060	233.201	-9.150	71.998
0.0549	24.091	233.539	-9.175	71.997
0.0550	24.122	233.878	-9.200	71.997
0.0551	24.153	234.219	-9.225	71.997
0.0552	24.184	234.561	-9.250	71.996
0.0553	24.215	234.904	-9.275	71.996
0.0554	24.246	235.248	-9.300	71.996
0.0555	24.277	235.593	-9.325	71.995
0.0556	24.309	235.940	-9.350	71.995
0.0557	24.340	236.288	-9.375	71.995
0.0558	24.371	236.637	-9.400	71.995
0.0559	24.402	236.987	-9.425	71.994
0.0560	24.433	237.339	-9.449	71.994
0.0561	24.464	237.692	-9.474	71.994
0.0562	24.495	238.046	-9.499	71.993
0.0563	24.526	238.401	-9.524	71.993
0.0564	24.557	238.757	-9.549	71.993
0.0565	24.588	239.115	-9.574	71.993
0.0566	24.619	239.474	-9.598	71.992
0.0567	24.650	239.835	-9.623	71.992
0.0568	24.681	240.196	-9.648	71.992
0.0569	24.713	240.559	-9.673	71.991
0.0570	24.744	240.924	-9.697	71.991
0.0571	24.775	241.289	-9.722	71.991
0.0572	24.806	241.656	-9.747	71.991
0.0573	24.837	242.024	-9.772	71.990
0.0574	24.868	242.394	-9.796	71.990
0.0575	24.899	242.764	-9.821	71.990
0.0576	24.930	243.137	-9.845	71.989

SLIP	STAR (case 1)		STAR (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0577	24.961	243.510	-9.870	71.989
0.0578	24.992	243.885	-9.895	71.989
0.0579	25.023	244.261	-9.919	71.989
0.0580	25.054	244.639	-9.944	71.988
0.0581	25.085	245.018	-9.968	71.988
0.0582	25.116	245.398	-9.993	71.988
0.0583	25.147	245.780	-10.017	71.987
0.0584	25.178	246.163	-10.042	71.987
0.0585	25.209	246.548	-10.066	71.987
0.0586	25.240	246.933	-10.091	71.987
0.0587	25.271	247.321	-10.115	71.986
0.0588	25.302	247.710	-10.140	71.986
0.0589	25.333	248.100	-10.164	71.986
0.0590	25.364	248.491	-10.189	71.985
0.0591	25.395	248.884	-10.213	71.985
0.0592	25.426	249.279	-10.237	71.985
0.0593	25.457	249.675	-10.262	71.985
0.0594	25.488	250.072	-10.286	71.984
0.0595	25.519	250.471	-10.310	71.984
0.0596	25.550	250.872	-10.335	71.984
0.0597	25.581	251.273	-10.359	71.983
0.0598	25.612	251.677	-10.383	71.983
0.0599	25.643	252.082	-10.408	71.983
0.0600	25.674	252.488	-10.432	71.983

- พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ delta (แบบที่ 1)



รูปที่ 7 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta แบบที่ 1

$$3Y_1Y_2(K_2Y_1+K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c-(K_1Y_1+K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = 3Y_1Y_2(K_2Y_1+K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = -(K_1Y_1+K_2Y_2)$

Y_1 = ขนาดของ Positive Sequence Admittance

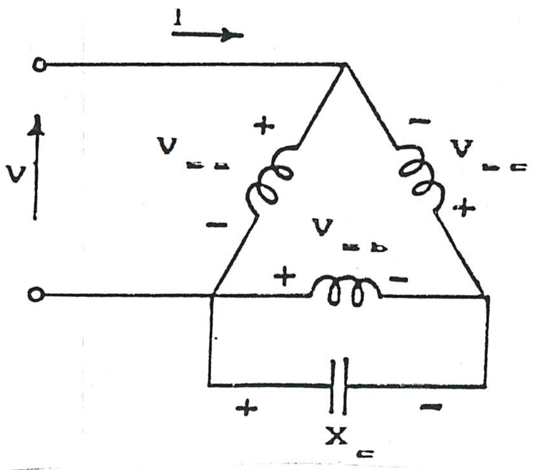
Y_2 = ขนาดของ Negative Sequence Admittance

$K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 - 3\sin\phi_1$; ϕ_1 = มุมของ Positive Sequence Admittance

$K_2 = \sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$; ϕ_2 = มุมของ Negative Sequence Admittance

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

- พิจารณาการต่อขดลวดทางด้าน stator เป็นแบบ delta (แบบที่ 2)



รูปที่ 8 แสดงการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta แบบที่ 2

$$3Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)X_c^2+6(Y_1^2-Y_2^2)X_c+(K_1Y_1-K_2Y_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0$$

โดย $A = 3Y_1Y_2(K_2Y_1-K_1Y_2)$

$B = 6(Y_1^2-Y_2^2)$

$C = K_1Y_1-K_2Y_2$

Y_1 = ขนาดของ Positive Sequence Admittance

Y_2 = ขนาดของ Negative Sequence Admittance

$K_1 = \sqrt{3}\cos\phi_1 + 3\sin\phi_1$; ϕ_1 = มุมของ Positive Sequence Admittance

$K_2 = -\sqrt{3}\cos\phi_2 + 3\sin\phi_2$; ϕ_2 = มุมของ Negative Sequence Admittance

สามารถหาค่า X_c ได้ 2 ค่า

จากกรณีการต่อขดลวดทางด้าน stator แบบ delta ทั้ง 2 กรณี สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า slip กับ ขนาด capacitor ได้โดยการเขียนโปรแกรม lotus ดังนี้

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0001	24.586	427.760	22.319	216.650
0.0002	24.660	427.984	22.210	216.648
0.0003	24.735	428.208	22.101	216.647
0.0004	24.809	428.432	21.992	216.645
0.0005	24.884	428.657	21.882	216.643
0.0006	24.958	428.883	21.773	216.642
0.0007	25.033	429.109	21.664	216.640
0.0008	25.108	429.336	21.555	216.638
0.0009	25.182	429.563	21.447	216.637
0.0010	25.257	429.791	21.338	216.635
0.0011	25.332	430.019	21.229	216.633
0.0012	25.407	430.248	21.121	216.632
0.0013	25.482	430.477	21.012	216.630
0.0014	25.557	430.707	20.904	216.628
0.0015	25.632	430.938	20.795	216.627
0.0016	25.707	431.169	20.687	216.625
0.0017	25.783	431.400	20.579	216.623
0.0018	25.858	431.632	20.471	216.622
0.0019	25.933	431.865	20.363	216.620
0.0020	26.009	432.098	20.255	216.619
0.0021	26.084	432.332	20.147	216.617
0.0022	26.160	432.566	20.039	216.615
0.0023	26.236	432.801	19.931	216.614
0.0024	26.311	433.037	19.823	216.612
0.0025	26.387	433.273	19.716	216.610
0.0026	26.463	433.509	19.608	216.609
0.0027	26.539	433.746	19.501	216.607
0.0028	26.615	433.984	19.394	216.606
0.0029	26.691	434.222	19.286	216.604
0.0030	26.767	434.461	19.179	216.602
0.0031	26.843	434.701	19.072	216.601
0.0032	26.919	434.941	18.965	216.599
0.0033	26.996	435.181	18.858	216.597
0.0034	27.072	435.422	18.751	216.596
0.0035	27.148	435.664	18.644	216.594
0.0036	27.225	435.906	18.537	216.593
0.0037	27.301	436.149	18.431	216.591
0.0038	27.378	436.392	18.324	216.589
0.0039	27.455	436.636	18.218	216.588
0.0040	27.531	436.881	18.111	216.586
0.0041	27.608	437.126	18.005	216.585
0.0042	27.685	437.372	17.898	216.583
0.0043	27.762	437.618	17.792	216.582
0.0044	27.839	437.865	17.686	216.580
0.0045	27.916	438.112	17.580	216.578
0.0046	27.993	438.360	17.474	216.577
0.0047	28.070	438.609	17.368	216.575
0.0048	28.147	438.858	17.262	216.574

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0049	28.225	439.108	17.156	216.572
0.0050	28.302	439.359	17.051	216.571
0.0051	28.380	439.610	16.945	216.569
0.0052	28.457	439.861	16.840	216.567
0.0053	28.534	440.114	16.734	216.566
0.0054	28.612	440.367	16.629	216.564
0.0055	28.690	440.620	16.523	216.563
0.0056	28.767	440.874	16.418	216.561
0.0057	28.845	441.129	16.313	216.560
0.0058	28.923	441.384	16.208	216.558
0.0059	29.001	441.640	16.103	216.557
0.0060	29.079	441.897	15.998	216.555
0.0061	29.157	442.154	15.893	216.554
0.0062	29.235	442.412	15.788	216.552
0.0063	29.313	442.670	15.683	216.550
0.0064	29.391	442.929	15.579	216.549
0.0065	29.470	443.189	15.474	216.547
0.0066	29.548	443.449	15.370	216.546
0.0067	29.626	443.710	15.265	216.544
0.0068	29.705	443.971	15.161	216.543
0.0069	29.783	444.233	15.057	216.541
0.0070	29.862	444.496	14.952	216.540
0.0071	29.940	444.759	14.848	216.538
0.0072	30.019	445.023	14.744	216.537
0.0073	30.098	445.288	14.640	216.535
0.0074	30.176	445.553	14.536	216.534
0.0075	30.255	445.819	14.432	216.532
0.0076	30.334	446.086	14.329	216.531
0.0077	30.413	446.353	14.225	216.529
0.0078	30.492	446.621	14.121	216.528
0.0079	30.571	446.890	14.018	216.526
0.0080	30.650	447.159	13.914	216.525
0.0081	30.730	447.429	13.811	216.523
0.0082	30.809	447.699	13.708	216.522
0.0083	30.888	447.970	13.604	216.520
0.0084	30.967	448.242	13.501	216.519
0.0085	31.047	448.515	13.398	216.517
0.0086	31.126	448.788	13.295	216.516
0.0087	31.206	449.061	13.192	216.514
0.0088	31.286	449.336	13.089	216.513
0.0089	31.365	449.611	12.986	216.511
0.0090	31.445	449.887	12.884	216.510
0.0091	31.525	450.163	12.781	216.508
0.0092	31.605	450.440	12.678	216.507
0.0093	31.684	450.718	12.576	216.505
0.0094	31.764	450.997	12.473	216.504
0.0095	31.844	451.276	12.371	216.502
0.0096	31.924	451.555	12.269	216.501

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0097	32.005	451.836	12.166	216.500
0.0098	32.085	452.117	12.064	216.498
0.0099	32.165	452.399	11.962	216.497
0.0100	32.245	452.682	11.860	216.495
0.0101	32.326	452.965	11.758	216.494
0.0102	32.406	453.249	11.656	216.492
0.0103	32.486	453.533	11.554	216.491
0.0104	32.567	453.819	11.453	216.489
0.0105	32.648	454.105	11.351	216.488
0.0106	32.728	454.391	11.249	216.487
0.0107	32.809	454.679	11.148	216.485
0.0108	32.890	454.967	11.046	216.484
0.0109	32.970	455.256	10.945	216.482
0.0110	33.051	455.545	10.844	216.481
0.0111	33.132	455.836	10.743	216.479
0.0112	33.213	456.127	10.641	216.478
0.0113	33.294	456.418	10.540	216.476
0.0114	33.375	456.711	10.439	216.475
0.0115	33.456	457.004	10.338	216.474
0.0116	33.537	457.298	10.237	216.472
0.0117	33.619	457.592	10.137	216.471
0.0118	33.700	457.887	10.036	216.469
0.0119	33.781	458.183	9.935	216.468
0.0120	33.863	458.480	9.835	216.467
0.0121	33.944	458.778	9.734	216.465
0.0122	34.026	459.076	9.634	216.464
0.0123	34.107	459.375	9.533	216.462
0.0124	34.189	459.674	9.433	216.461
0.0125	34.271	459.975	9.333	216.459
0.0126	34.352	460.276	9.232	216.458
0.0127	34.434	460.578	9.132	216.457
0.0128	34.516	460.880	9.032	216.455
0.0129	34.598	461.184	8.932	216.454
0.0130	34.680	461.488	8.832	216.452
0.0131	34.762	461.793	8.733	216.451
0.0132	34.844	462.098	8.633	216.450
0.0133	34.926	462.405	8.533	216.448
0.0134	35.008	462.712	8.434	216.447
0.0135	35.090	463.020	8.334	216.446
0.0136	35.173	463.329	8.234	216.444
0.0137	35.255	463.638	8.135	216.443
0.0138	35.337	463.948	8.036	216.441
0.0139	35.420	464.259	7.936	216.440
0.0140	35.502	464.571	7.837	216.439
0.0141	35.585	464.883	7.738	216.437
0.0142	35.667	465.197	7.639	216.436
0.0143	35.750	465.511	7.540	216.435
0.0144	35.833	465.826	7.441	216.433

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0145	35.915	466.141	7.342	216.432
0.0146	35.998	466.458	7.244	216.430
0.0147	36.081	466.775	7.145	216.429
0.0148	36.164	467.093	7.046	216.428
0.0149	36.247	467.412	6.948	216.426
0.0150	36.330	467.731	6.849	216.425
0.0151	36.413	468.052	6.751	216.424
0.0152	36.496	468.373	6.652	216.422
0.0153	36.579	468.695	6.554	216.421
0.0154	36.662	469.018	6.456	216.420
0.0155	36.746	469.341	6.358	216.418
0.0156	36.829	469.666	6.260	216.417
0.0157	36.912	469.991	6.162	216.416
0.0158	36.996	470.317	6.064	216.414
0.0159	37.079	470.644	5.966	216.413
0.0160	37.163	470.972	5.868	216.411
0.0161	37.246	471.300	5.770	216.410
0.0162	37.330	471.630	5.672	216.409
0.0163	37.414	471.960	5.575	216.407
0.0164	37.497	472.291	5.477	216.406
0.0165	37.581	472.623	5.380	216.405
0.0166	37.665	472.955	5.282	216.403
0.0167	37.749	473.289	5.185	216.402
0.0168	37.833	473.623	5.088	216.401
0.0169	37.917	473.958	4.991	216.399
0.0170	38.001	474.294	4.893	216.398
0.0171	38.085	474.631	4.796	216.397
0.0172	38.169	474.969	4.699	216.396
0.0173	38.253	475.308	4.602	216.394
0.0174	38.337	475.647	4.506	216.393
0.0175	38.422	475.987	4.409	216.392
0.0176	38.506	476.329	4.312	216.390
0.0177	38.590	476.671	4.215	216.389
0.0178	38.675	477.014	4.119	216.388
0.0179	38.759	477.357	4.022	216.386
0.0180	38.844	477.702	3.926	216.385
0.0181	38.928	478.048	3.829	216.384
0.0182	39.013	478.394	3.733	216.382
0.0183	39.097	478.741	3.637	216.381
0.0184	39.182	479.089	3.541	216.380
0.0185	39.267	479.438	3.444	216.379
0.0186	39.352	479.788	3.348	216.377
0.0187	39.437	480.139	3.252	216.376
0.0188	39.521	480.491	3.156	216.375
0.0189	39.606	480.844	3.061	216.373
0.0190	39.691	481.197	2.965	216.372
0.0191	39.776	481.552	2.869	216.371
0.0192	39.861	481.907	2.773	216.369

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0193	39.947	482.263	2.678	216.368
0.0194	40.032	482.620	2.582	216.367
0.0195	40.117	482.978	2.487	216.366
0.0196	40.202	483.337	2.391	216.364
0.0197	40.288	483.697	2.296	216.363
0.0198	40.373	484.058	2.201	216.362
0.0199	40.458	484.420	2.106	216.361
0.0200	40.544	484.783	2.011	216.359
0.0201	40.629	485.146	1.916	216.358
0.0202	40.715	485.511	1.821	216.357
0.0203	40.801	485.876	1.726	216.355
0.0204	40.886	486.243	1.631	216.354
0.0205	40.972	486.610	1.536	216.353
0.0206	41.058	486.978	1.441	216.352
0.0207	41.143	487.348	1.347	216.350
0.0208	41.229	487.718	1.252	216.349
0.0209	41.315	488.089	1.157	216.348
0.0210	41.401	488.461	1.063	216.347
0.0211	41.487	488.834	0.969	216.345
0.0212	41.573	489.208	0.874	216.344
0.0213	41.659	489.584	0.780	216.343
0.0214	41.745	489.960	0.686	216.342
0.0215	41.831	490.337	0.592	216.340
0.0216	41.918	490.714	0.498	216.339
0.0217	42.004	491.093	0.403	216.338
0.0218	42.090	491.473	0.310	216.337
0.0219	42.176	491.854	0.216	216.335
0.0220	42.263	492.236	0.122	216.334
0.0221	42.349	492.619	0.028	216.333
0.0222	42.436	493.003	-0.066	216.332
0.0223	42.522	493.388	-0.159	216.330
0.0224	42.609	493.774	-0.253	216.329
0.0225	42.695	494.161	-0.346	216.328
0.0226	42.782	494.549	-0.440	216.327
0.0227	42.869	494.938	-0.533	216.325
0.0228	42.955	495.328	-0.626	216.324
0.0229	43.042	495.718	-0.720	216.323
0.0230	43.129	496.110	-0.813	216.322
0.0231	43.216	496.503	-0.906	216.321
0.0232	43.303	496.898	-0.999	216.319
0.0233	43.390	497.293	-1.092	216.318
0.0234	43.477	497.689	-1.185	216.317
0.0235	43.564	498.086	-1.278	216.316
0.0236	43.651	498.484	-1.370	216.314
0.0237	43.738	498.883	-1.463	216.313
0.0238	43.825	499.284	-1.556	216.312
0.0239	43.912	499.685	-1.648	216.311
0.0240	43.999	500.087	-1.741	216.310

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0241	44.087	500.491	-1.833	216.308
0.0242	44.174	500.895	-1.926	216.307
0.0243	44.261	501.301	-2.018	216.306
0.0244	44.349	501.708	-2.110	216.305
0.0245	44.436	502.115	-2.202	216.304
0.0246	44.524	502.524	-2.295	216.302
0.0247	44.611	502.934	-2.387	216.301
0.0248	44.699	503.345	-2.479	216.300
0.0249	44.786	503.757	-2.571	216.299
0.0250	44.874	504.170	-2.663	216.298
0.0251	44.962	504.585	-2.754	216.296
0.0252	45.049	505.000	-2.846	216.295
0.0253	45.137	505.417	-2.938	216.294
0.0254	45.225	505.834	-3.029	216.293
0.0255	45.313	506.253	-3.121	216.292
0.0256	45.401	506.673	-3.213	216.290
0.0257	45.488	507.094	-3.304	216.289
0.0258	45.576	507.516	-3.395	216.288
0.0259	45.664	507.939	-3.487	216.287
0.0260	45.752	508.363	-3.578	216.286
0.0261	45.841	508.788	-3.669	216.284
0.0262	45.929	509.215	-3.760	216.283
0.0263	46.017	509.643	-3.851	216.282
0.0264	46.105	510.072	-3.942	216.281
0.0265	46.193	510.502	-4.033	216.280
0.0266	46.282	510.933	-4.124	216.279
0.0267	46.370	511.365	-4.215	216.277
0.0268	46.458	511.799	-4.306	216.276
0.0269	46.547	512.233	-4.396	216.275
0.0270	46.635	512.669	-4.487	216.274
0.0271	46.724	513.106	-4.578	216.273
0.0272	46.812	513.544	-4.668	216.272
0.0273	46.901	513.983	-4.759	216.270
0.0274	46.989	514.424	-4.849	216.269
0.0275	47.078	514.866	-4.939	216.268
0.0276	47.166	515.309	-5.030	216.267
0.0277	47.255	515.753	-5.120	216.266
0.0278	47.344	516.198	-5.210	216.265
0.0279	47.433	516.645	-5.300	216.263
0.0280	47.521	517.092	-5.390	216.262
0.0281	47.610	517.541	-5.480	216.261
0.0282	47.699	517.991	-5.570	216.260
0.0283	47.788	518.443	-5.660	216.259
0.0284	47.877	518.895	-5.749	216.258
0.0285	47.966	519.349	-5.839	216.257
0.0286	48.055	519.804	-5.929	216.255
0.0287	48.144	520.260	-6.018	216.254
0.0288	48.233	520.718	-6.108	216.253

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0289	48.322	521.177	-6.197	216.252
0.0290	48.411	521.637	-6.287	216.251
0.0291	48.501	522.098	-6.376	216.250
0.0292	48.590	522.561	-6.465	216.249
0.0293	48.679	523.024	-6.554	216.247
0.0294	48.768	523.489	-6.644	216.246
0.0295	48.858	523.956	-6.733	216.245
0.0296	48.947	524.423	-6.822	216.244
0.0297	49.037	524.892	-6.911	216.243
0.0298	49.126	525.362	-7.000	216.242
0.0299	49.216	525.834	-7.088	216.241
0.0300	49.305	526.307	-7.177	216.239
0.0301	49.395	526.781	-7.266	216.238
0.0302	49.484	527.256	-7.355	216.237
0.0303	49.574	527.733	-7.443	216.236
0.0304	49.663	528.211	-7.532	216.235
0.0305	49.753	528.690	-7.620	216.234
0.0306	49.843	529.171	-7.709	216.233
0.0307	49.933	529.653	-7.797	216.232
0.0308	50.022	530.136	-7.885	216.230
0.0309	50.112	530.621	-7.973	216.229
0.0310	50.202	531.107	-8.062	216.228
0.0311	50.292	531.594	-8.150	216.227
0.0312	50.382	532.083	-8.238	216.226
0.0313	50.472	532.573	-8.326	216.225
0.0314	50.562	533.064	-8.414	216.224
0.0315	50.652	533.557	-8.502	216.223
0.0316	50.742	534.051	-8.589	216.222
0.0317	50.832	534.546	-8.677	216.220
0.0318	50.922	535.043	-8.765	216.219
0.0319	51.012	535.542	-8.853	216.218
0.0320	51.102	536.041	-8.940	216.217
0.0321	51.192	536.542	-9.028	216.216
0.0322	51.283	537.045	-9.115	216.215
0.0323	51.373	537.549	-9.202	216.214
0.0324	51.463	538.054	-9.290	216.213
0.0325	51.554	538.561	-9.377	216.212
0.0326	51.644	539.069	-9.464	216.211
0.0327	51.734	539.578	-9.551	216.209
0.0328	51.825	540.089	-9.639	216.208
0.0329	51.915	540.601	-9.726	216.207
0.0330	52.006	541.115	-9.813	216.206
0.0331	52.096	541.631	-9.900	216.205
0.0332	52.187	542.147	-9.986	216.204
0.0333	52.277	542.665	-10.073	216.203
0.0334	52.368	543.185	-10.160	216.202
0.0335	52.458	543.706	-10.247	216.201
0.0336	52.549	544.229	-10.333	216.200

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0337	52.640	544.753	-10.420	216.199
0.0338	52.731	545.278	-10.506	216.197
0.0339	52.821	545.805	-10.593	216.196
0.0340	52.912	546.334	-10.679	216.195
0.0341	53.003	546.864	-10.766	216.194
0.0342	53.094	547.395	-10.852	216.193
0.0343	53.185	547.928	-10.938	216.192
0.0344	53.275	548.463	-11.024	216.191
0.0345	53.366	548.999	-11.110	216.190
0.0346	53.457	549.536	-11.196	216.189
0.0347	53.548	550.076	-11.282	216.188
0.0348	53.639	550.616	-11.368	216.187
0.0349	53.730	551.158	-11.454	216.186
0.0350	53.821	551.702	-11.540	216.185
0.0351	53.912	552.247	-11.626	216.183
0.0352	54.003	552.794	-11.711	216.182
0.0353	54.095	553.343	-11.797	216.181
0.0354	54.186	553.893	-11.883	216.180
0.0355	54.277	554.444	-11.968	216.179
0.0356	54.368	554.997	-12.054	216.178
0.0357	54.459	555.552	-12.139	216.177
0.0358	54.551	556.108	-12.224	216.176
0.0359	54.642	556.666	-12.310	216.175
0.0360	54.733	557.226	-12.395	216.174
0.0361	54.824	557.787	-12.480	216.173
0.0362	54.916	558.350	-12.565	216.172
0.0363	55.007	558.914	-12.650	216.171
0.0364	55.099	559.480	-12.735	216.170
0.0365	55.190	560.048	-12.820	216.169
0.0366	55.282	560.617	-12.905	216.168
0.0367	55.373	561.188	-12.990	216.167
0.0368	55.465	561.761	-13.075	216.165
0.0369	55.556	562.335	-13.159	216.164
0.0370	55.648	562.911	-13.244	216.163
0.0371	55.739	563.488	-13.329	216.162
0.0372	55.831	564.068	-13.413	216.161
0.0373	55.922	564.649	-13.498	216.160
0.0374	56.014	565.231	-13.582	216.159
0.0375	56.106	565.816	-13.666	216.158
0.0376	56.197	566.402	-13.751	216.157
0.0377	56.289	566.990	-13.835	216.156
0.0378	56.381	567.579	-13.919	216.155
0.0379	56.473	568.170	-14.003	216.154
0.0380	56.564	568.763	-14.087	216.153
0.0381	56.656	569.358	-14.171	216.152
0.0382	56.748	569.954	-14.255	216.151
0.0383	56.840	570.552	-14.339	216.150
0.0384	56.932	571.152	-14.423	216.149

SLIP	DELTA (case 1) C (uF)	DELTA (case 1) C (uF)	DELTA (case2) C (uF)	DELTA (case2) C (uF)
0.0385	57.024	571.754	-14.507	216.148
0.0386	57.116	572.358	-14.591	216.147
0.0387	57.208	572.963	-14.674	216.146
0.0388	57.300	573.570	-14.758	216.145
0.0389	57.392	574.179	-14.842	216.144
0.0390	57.484	574.789	-14.925	216.143
0.0391	57.576	575.402	-15.009	216.142
0.0392	57.668	576.016	-15.092	216.141
0.0393	57.760	576.632	-15.175	216.140
0.0394	57.852	577.250	-15.259	216.139
0.0395	57.944	577.870	-15.342	216.138
0.0396	58.036	578.491	-15.425	216.137
0.0397	58.128	579.115	-15.508	216.136
0.0398	58.220	579.740	-15.591	216.135
0.0399	58.313	580.367	-15.674	216.134
0.0400	58.405	580.996	-15.757	216.132
0.0401	58.497	581.627	-15.840	216.131
0.0402	58.589	582.260	-15.923	216.130
0.0403	58.682	582.894	-16.006	216.129
0.0404	58.774	583.531	-16.089	216.128
0.0405	58.866	584.169	-16.171	216.127
0.0406	58.958	584.810	-16.254	216.126
0.0407	59.051	585.452	-16.337	216.125
0.0408	59.143	586.096	-16.419	216.124
0.0409	59.236	586.742	-16.502	216.123
0.0410	59.328	587.390	-16.584	216.122
0.0411	59.420	588.040	-16.666	216.121
0.0412	59.513	588.692	-16.749	216.120
0.0413	59.605	589.346	-16.831	216.119
0.0414	59.698	590.002	-16.913	216.118
0.0415	59.790	590.660	-16.995	216.117
0.0416	59.883	591.320	-17.077	216.116
0.0417	59.975	591.982	-17.159	216.115
0.0418	60.068	592.646	-17.241	216.114
0.0419	60.160	593.312	-17.323	216.113
0.0420	60.253	593.980	-17.405	216.112
0.0421	60.345	594.650	-17.487	216.111
0.0422	60.438	595.322	-17.569	216.110
0.0423	60.531	595.996	-17.650	216.109
0.0424	60.623	596.672	-17.732	216.108
0.0425	60.716	597.350	-17.814	216.107
0.0426	60.809	598.030	-17.895	216.106
0.0427	60.901	598.713	-17.977	216.105
0.0428	60.994	599.397	-18.058	216.104
0.0429	61.087	600.084	-18.139	216.104
0.0430	61.179	600.772	-18.221	216.103
0.0431	61.272	601.463	-18.302	216.102
0.0432	61.365	602.156	-18.383	216.101

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0433	61.458	602.851	-18.464	216.100
0.0434	61.550	603.548	-18.545	216.099
0.0435	61.643	604.247	-18.627	216.098
0.0436	61.736	604.948	-18.708	216.097
0.0437	61.829	605.652	-18.788	216.096
0.0438	61.922	606.358	-18.869	216.095
0.0439	62.015	607.066	-18.950	216.094
0.0440	62.107	607.776	-19.031	216.093
0.0441	62.200	608.488	-19.112	216.092
0.0442	62.293	609.203	-19.192	216.091
0.0443	62.386	609.919	-19.273	216.090
0.0444	62.479	610.638	-19.354	216.089
0.0445	62.572	611.359	-19.434	216.088
0.0446	62.665	612.083	-19.515	216.087
0.0447	62.758	612.809	-19.595	216.086
0.0448	62.851	613.537	-19.675	216.085
0.0449	62.944	614.267	-19.756	216.084
0.0450	63.037	614.999	-19.836	216.083
0.0451	63.130	615.734	-19.916	216.082
0.0452	63.223	616.471	-19.996	216.081
0.0453	63.316	617.211	-20.076	216.080
0.0454	63.409	617.952	-20.156	216.079
0.0455	63.502	618.696	-20.236	216.078
0.0456	63.595	619.443	-20.316	216.077
0.0457	63.688	620.192	-20.396	216.076
0.0458	63.781	620.943	-20.476	216.075
0.0459	63.874	621.696	-20.556	216.074
0.0460	63.967	622.452	-20.635	216.073
0.0461	64.060	623.210	-20.715	216.072
0.0462	64.153	623.971	-20.795	216.072
0.0463	64.247	624.734	-20.874	216.071
0.0464	64.340	625.499	-20.954	216.070
0.0465	64.433	626.267	-21.033	216.069
0.0466	64.526	627.038	-21.113	216.068
0.0467	64.619	627.810	-21.192	216.067
0.0468	64.712	628.586	-21.271	216.066
0.0469	64.806	629.363	-21.350	216.065
0.0470	64.899	630.144	-21.430	216.064
0.0471	64.992	630.926	-21.509	216.063
0.0472	65.085	631.711	-21.588	216.062
0.0473	65.178	632.499	-21.667	216.061
0.0474	65.272	633.289	-21.746	216.060
0.0475	65.365	634.082	-21.825	216.059
0.0476	65.458	634.877	-21.904	216.058
0.0477	65.551	635.675	-21.982	216.057
0.0478	65.644	636.476	-22.061	216.056
0.0479	65.738	637.279	-22.140	216.055
0.0480	65.831	638.084	-22.219	216.054

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0481	65.924	638.892	-22.297	216.054
0.0482	66.017	639.703	-22.376	216.053
0.0483	66.111	640.517	-22.454	216.052
0.0484	66.204	641.333	-22.533	216.051
0.0485	66.297	642.151	-22.611	216.050
0.0486	66.391	642.973	-22.690	216.049
0.0487	66.484	643.797	-22.768	216.048
0.0488	66.577	644.623	-22.846	216.047
0.0489	66.671	645.453	-22.924	216.046
0.0490	66.764	646.285	-23.002	216.045
0.0491	66.857	647.119	-23.081	216.044
0.0492	66.951	647.957	-23.159	216.043
0.0493	67.044	648.797	-23.237	216.042
0.0494	67.137	649.640	-23.315	216.041
0.0495	67.231	650.486	-23.392	216.041
0.0496	67.324	651.334	-23.470	216.040
0.0497	67.417	652.186	-23.548	216.039
0.0498	67.511	653.040	-23.626	216.038
0.0499	67.604	653.897	-23.704	216.037
0.0500	67.697	654.756	-23.781	216.036
0.0501	67.791	655.619	-23.859	216.035
0.0502	67.884	656.484	-23.936	216.034
0.0503	67.977	657.353	-24.014	216.033
0.0504	68.071	658.224	-24.091	216.032
0.0505	68.164	659.098	-24.169	216.031
0.0506	68.257	659.975	-24.246	216.030
0.0507	68.351	660.855	-24.323	216.029
0.0508	68.444	661.737	-24.401	216.029
0.0509	68.538	662.623	-24.478	216.028
0.0510	68.631	663.512	-24.555	216.027
0.0511	68.724	664.403	-24.632	216.026
0.0512	68.818	665.298	-24.709	216.025
0.0513	68.911	666.195	-24.786	216.024
0.0514	69.005	667.096	-24.863	216.023
0.0515	69.098	668.000	-24.940	216.022
0.0516	69.191	668.906	-25.017	216.021
0.0517	69.285	669.816	-25.093	216.020
0.0518	69.378	670.728	-25.170	216.019
0.0519	69.471	671.644	-25.247	216.019
0.0520	69.565	672.563	-25.323	216.018
0.0521	69.658	673.485	-25.400	216.017
0.0522	69.752	674.410	-25.477	216.016
0.0523	69.845	675.338	-25.553	216.015
0.0524	69.938	676.270	-25.629	216.014
0.0525	70.032	677.204	-25.706	216.013
0.0526	70.125	678.142	-25.782	216.012
0.0527	70.219	679.083	-25.858	216.011
0.0528	70.312	680.027	-25.935	216.010

SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0529	70.405	680.974	-26.011	216.010
0.0530	70.499	681.924	-26.087	216.009
0.0531	70.592	682.878	-26.163	216.008
0.0532	70.685	683.835	-26.239	216.007
0.0533	70.779	684.795	-26.315	216.006
0.0534	70.872	685.759	-26.391	216.005
0.0535	70.966	686.726	-26.467	216.004
0.0536	71.059	687.696	-26.543	216.003
0.0537	71.152	688.669	-26.619	216.002
0.0538	71.246	689.646	-26.694	216.001
0.0539	71.339	690.626	-26.770	216.001
0.0540	71.432	691.610	-26.846	216.000
0.0541	71.526	692.597	-26.921	215.999
0.0542	71.619	693.587	-26.997	215.998
0.0543	71.712	694.581	-27.072	215.997
0.0544	71.806	695.578	-27.148	215.996
0.0545	71.899	696.579	-27.223	215.995
0.0546	71.992	697.583	-27.298	215.994
0.0547	72.086	698.591	-27.374	215.994
0.0548	72.179	699.602	-27.449	215.993
0.0549	72.272	700.617	-27.524	215.992
0.0550	72.366	701.635	-27.599	215.991
0.0551	72.459	702.657	-27.674	215.990
0.0552	72.552	703.682	-27.750	215.989
0.0553	72.646	704.711	-27.825	215.988
0.0554	72.739	705.744	-27.899	215.987
0.0555	72.832	706.780	-27.974	215.986
0.0556	72.926	707.820	-28.049	215.986
0.0557	73.019	708.864	-28.124	215.985
0.0558	73.112	709.911	-28.199	215.984
0.0559	73.205	710.962	-28.274	215.983
0.0560	73.299	712.016	-28.348	215.982
0.0561	73.392	713.075	-28.423	215.981
0.0562	73.485	714.137	-28.497	215.980
0.0563	73.578	715.203	-28.572	215.979
0.0564	73.672	716.272	-28.646	215.979
0.0565	73.765	717.346	-28.721	215.978
0.0566	73.858	718.423	-28.795	215.977
0.0567	73.951	719.504	-28.870	215.976
0.0568	74.044	720.589	-28.944	215.975
0.0569	74.138	721.678	-29.018	215.974
0.0570	74.231	722.771	-29.092	215.973
0.0571	74.324	723.867	-29.166	215.973
0.0572	74.417	724.968	-29.240	215.972
0.0573	74.510	726.072	-29.315	215.971
0.0574	74.603	727.181	-29.388	215.970
0.0575	74.697	728.293	-29.462	215.969
0.0576	74.790	729.410	-29.536	215.968

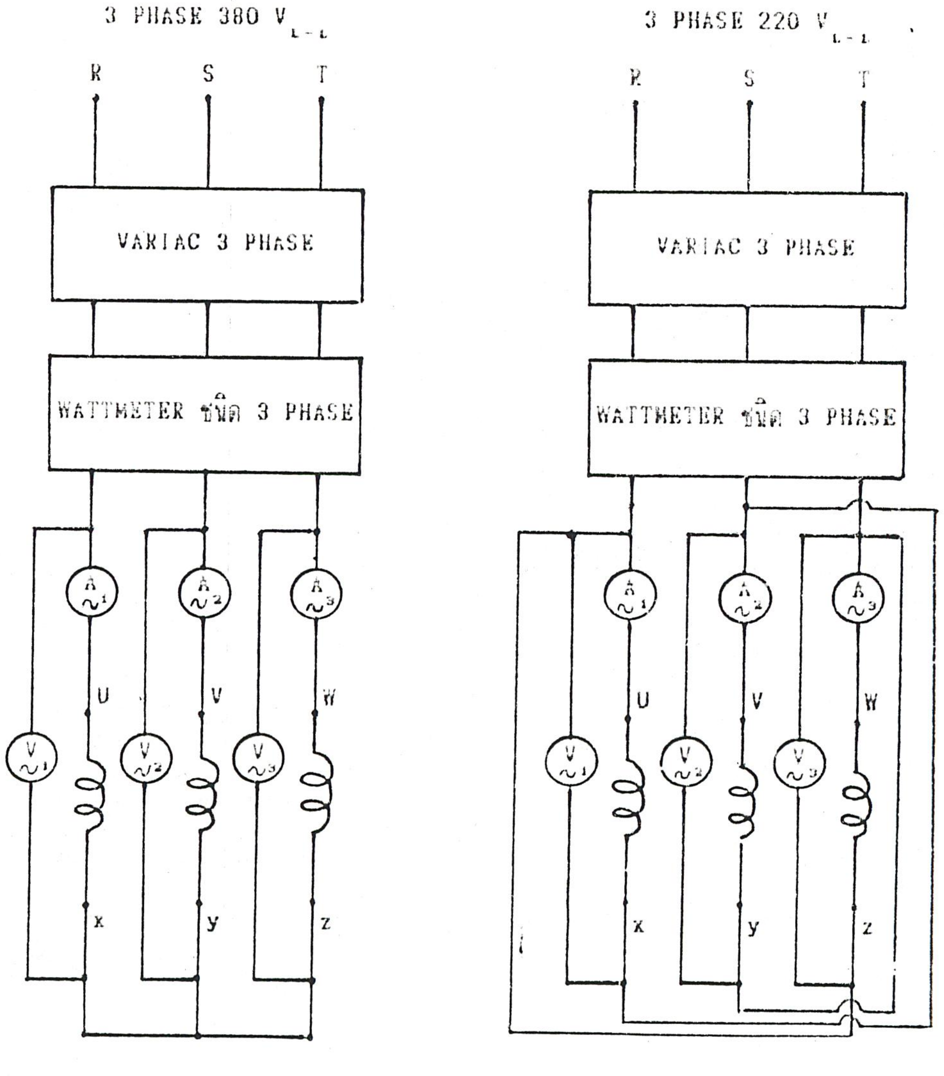
SLIP	DELTA (case 1)		DELTA (case2)	
	C (uF)	C (uF)	C (uF)	C (uF)
0.0577	74.883	730.531	-29.610	215.967
0.0578	74.976	731.655	-29.684	215.966
0.0579	75.069	732.784	-29.758	215.966
0.0580	75.162	733.917	-29.831	215.965
0.0581	75.255	735.054	-29.905	215.964
0.0582	75.348	736.195	-29.979	215.963
0.0583	75.441	737.340	-30.052	215.962
0.0584	75.534	738.489	-30.126	215.961
0.0585	75.627	739.643	-30.199	215.960
0.0586	75.720	740.800	-30.273	215.960
0.0587	75.813	741.962	-30.346	215.959
0.0588	75.906	743.129	-30.419	215.958
0.0589	75.999	744.299	-30.493	215.957
0.0590	76.092	745.474	-30.566	215.956
0.0591	76.185	746.653	-30.639	215.955
0.0592	76.278	747.837	-30.712	215.955
0.0593	76.371	749.025	-30.785	215.954
0.0594	76.464	750.217	-30.858	215.953
0.0595	76.557	751.414	-30.931	215.952
0.0596	76.650	752.615	-31.004	215.951
0.0597	76.743	753.820	-31.077	215.950
0.0598	76.836	755.030	-31.150	215.949
0.0599	76.929	756.245	-31.223	215.949
0.0600	77.021	757.464	-31.296	215.948

การทดลองที่ 2 การพิจารณาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อรับภาระทางกล โดยได้รับแหล่งจ่ายไฟชนิด 3 เฟส
2. ศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ และสภาวะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เมื่อต่อขดลวดทาง stator เป็นแบบ star และ delta

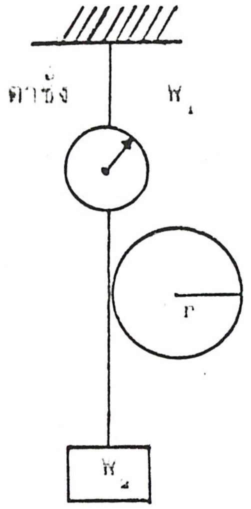
วงจรในการทดลอง



วงจร star

วงจร delta

รูปที่ 9 แสดงการต่อแบบ star และ delta



รูปที่ 10 แสดงการหาพลังงานทางกลศาสตร์

<u>อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง</u>

1.	มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า	1	ชุด
2.	ชุดตาชั่งแขวนพร้อมชุดโหลด	1	ชุด
3.	AC ampmeter 0-5 A	3	ตัว
4.	AC voltmeter 0-300 V	3	ตัว
5.	multimeter	1	ตัว
6.	variac 3-ϕ	1	ตัว
7.	junction box	3	ชุด
8.	wattmeter 3 เฟส	1	ชุด
9.	wire	50	เส้น
10.	tachometer	1	ตัว

<u>วิธีการทดลอง</u>

1. ต่อวงจรทดลองดังรูป (stator ต่อแบบ star) และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 380 V. (V_{L-L}) ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. ทำการทดลองแบบ no load ก่อน เพื่อตรวจสอบว่าทิศทางการหมุนของมอเตอร์

ว่าถูกทิศทางหรือไม่ (ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ต้องทำให้เกิดแรงยกโหลดภาระ)

3. ทำการเพิ่มภาระที่โหลดค่าต่าง ๆ (load) วัดค่า Power Input, กระแส,แรงดันไฟฟ้า, ความเร็วรอบ จนกระทั่งกระแส ถึง rated currentที่ nameplate
4. บันทึกผลในตาราง
5. คำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงบิด ,Power Output และ ประสิทธิภาพ
6. ต่อวงจรทดลองดังรูป (stator ต่อแบบ delta) และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 V. (V_{L-L}) ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
7. ทำการทดลองดังข้อที่ 2 ถึงข้อ 5

<u>ผลการทดลอง</u>

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star (V_{L-L} = 380 v.)

LOAD (kg)	V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW $=W_2-W_1$ (kg)
	V_a	V_b	V_c	I_a	I_b	I_c			
NO-LOAD (ไม่มีเชือก)	222	223	220	1.22	1.34	1.22	95	1499	0.0
NO-LOAD (มีเชือก)	222	223	220	1.22	1.34	1.22	100	1497	0.0
0.25	222	223	220	1.22	1.34	1.22	120	1493	0.25
0.50	222	223	220	1.22	1.34	1.22	150	1490	0.50
0.75	222	223	220	1.22	1.34	1.22	200	1488	0.75
1.00	222	223	220	1.22	1.34	1.22	240	1485	1.00
1.25	222	223	220	1.22	1.40	1.22	250	1481	1.15
1.50	222	223	220	1.23	1.42	1.23	260	1478	1.40
1.75	222	223	220	1.24	1.44	1.24	290	1477	1.60
2.00	222	223	220	1.24	1.48	1.24	350	1475	1.95
2.25	222	223	220	1.25	1.50	1.26	370	1473	2.15
2.50	222	223	220	1.26	1.52	1.30	390	1470	2.38
2.75	222	223	220	1.28	1.54	1.32	400	1467	2.60
3.00	222	223	220	1.30	1.58	1.38	450	1464	2.85
3.25	222	223	220	1.30	1.59	1.38	460	1461	3.05
3.50	222	223	220	1.34	1.60	1.40	500	1459	3.33
3.75	222	223	220	1.38	1.62	1.40	550	1455	3.55
4.00	222	223	220	1.39	1.62	1.40	560	1452	3.70

LOAD (kg)	V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = w_2 - w_1$ (kg)
	V_a	V_b	V_c	I_a	I_b	I_c			
4.25	222	223	220	1.40	1.64	1.42	590	1449	3.95
4.50	222	223	220	1.40	1.68	1.42	600	1448	4.00
4.75	222	223	220	1.42	1.70	1.44	650	1445	4.33
5.00	222	223	220	1.46	1.78	1.50	680	1440	4.58
5.25	222	223	220	1.52	1.78	1.54	700	1437	4.75
5.50	222	223	220	1.56	1.80	1.58	750	1434	5.05
5.75	222	223	220	1.58	1.82	1.60	780	1431	5.30
6.00	222	223	220	1.60	1.92	1.60	800	1428	5.45
6.25	222	223	220	1.61	1.96	1.64	820	1424	5.60
6.50	222	223	220	1.62	1.96	1.70	870	1421	5.90
6.75	222	223	220	1.68	1.97	1.78	940	1418	6.35
7.00	222	223	220	1.74	1.98	1.80	980	1413	6.65

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta (V_{L-L} = 220 v.)

LOAD (kg)	V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = w_2 - w_1$ (kg)
	V_a	V_b	V_c	I_a	I_b	I_c			
NO-LOAD (ไม่มีเชือก)	220	222	220	1.20	1.30	1.18	130	1499	0.0
NO-LOAD (มีเชือก)	220	222	220	1.20	1.30	1.18	150	1495	0.0

LOAD (kg)	V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
	V_a	V_b	V_c	I_a	I_b	I_c			
0.25	220	222	220	1.20	1.30	1.18	190	1494	0.25
0.50	220	222	220	1.20	1.30	1.18	210	1492	0.50
0.75	220	222	220	1.20	1.30	1.18	240	1489	0.69
1.00	220	222	220	1.20	1.32	1.18	260	1485	0.90
1.25	220	222	220	1.20	1.38	1.18	290	1483	1.14
1.50	220	222	220	1.20	1.38	1.18	316	1479	1.40
1.75	220	222	220	1.20	1.38	1.18	336	1478	1.64
2.00	220	222	220	1.21	1.40	1.19	370	1476	1.89
2.25	220	222	220	1.22	1.40	1.19	390	1472	2.05
2.50	220	222	220	1.22	1.40	1.20	420	1469	2.29
2.75	220	222	220	1.24	1.40	1.20	450	1467	2.53
3.00	220	222	220	1.30	1.41	1.20	480	1463	2.77
3.25	220	222	220	1.30	1.42	1.20	516	1461	3.01
3.50	220	222	220	1.38	1.42	1.22	538	1457	3.13
3.75	220	222	220	1.38	1.48	1.24	568	1454	3.37
4.00	220	222	220	1.40	1.50	1.30	600	1452	3.60
4.25	220	222	220	1.41	1.50	1.30	640	1447	3.85
4.50	220	222	220	1.42	1.58	1.38	660	1443	4.09
4.75	220	222	220	1.50	1.60	1.38	696	1436	4.34
5.00	220	222	220	1.58	1.61	1.40	730	1430	4.59
5.25	220	222	220	1.59	1.64	1.42	776	1426	4.83
5.50	220	222	220	1.60	1.70	1.48	796	1424	5.07
5.75	220	222	220	1.64	1.78	1.50	840	1422	5.31

LOAD (kg)	V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_r (RPM)	$\Delta W = w_2 - w_1$ (kg)
	V_a	V_b	V_c	I_a	I_b	I_c			
6.00	220	222	220	1.70	1.80	1.56	870	1417	5.70
6.25	220	222	220	1.78	1.80	1.60	896	1411	5.88
6.50	220	222	220	1.80	1.84	1.80	930	1406	6.10
6.75	220	222	220	1.83	1.90	1.88	950	1401	6.35

- การคำนวณหา Torque Output , Power output และ Efficiency ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ กรณีขดลวด stator ต่อแบบ star และ delta

$$T_{o/p} = \Delta W * g * r \quad (N-M)$$

$$P_{o/p} = T_{o/p} * (2\pi N_r/60)$$

$$= (\Delta W * g * r) * (2\pi N_r/60) \quad (W)$$

$$\% \text{ Efficiency} = 100 * P_{o/p} / P_{i/p}$$

STAR (3 PHASE SUPPLY)

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	P o/p (W)	% EFF
NO-LOAD1	0.001	95	0.000	0.000	0.00
NO-LOAD2	0.002	100	0.000	0.000	0.00
0.25	0.005	120	0.184	28.770	23.97
0.50	0.007	150	0.368	57.424	38.28
0.75	0.008	200	0.552	86.020	43.01
1.00	0.010	240	0.736	114.462	47.69
1.25	0.013	250	0.846	131.276	52.51
1.50	0.015	260	1.030	159.491	61.34
1.75	0.015	290	1.177	182.152	62.81
2.00	0.017	350	1.435	221.697	63.34
2.25	0.018	370	1.582	244.104	65.97
2.50	0.020	390	1.751	269.667	69.15
2.75	0.022	400	1.913	293.993	73.50
3.00	0.024	450	2.097	321.603	71.47
3.25	0.026	460	2.244	343.466	74.67
3.50	0.027	500	2.450	374.484	74.90
3.75	0.030	550	2.612	398.130	72.39
4.00	0.032	560	2.722	414.097	73.95
4.25	0.034	590	2.906	441.163	74.77
4.50	0.035	600	2.943	446.439	74.41
4.75	0.037	650	3.186	482.269	74.20
5.00	0.040	680	3.370	508.349	74.76
5.25	0.042	700	3.495	526.119	75.16
5.50	0.044	750	3.716	558.180	74.42
5.75	0.046	780	3.899	584.587	74.95
6.00	0.048	800	4.010	599.872	74.98
6.25	0.051	820	4.120	614.655	74.96
6.50	0.053	870	4.341	646.219	74.28
6.75	0.055	940	4.672	694.039	73.83
7.00	0.056	980	4.856	720.345	73.50

DELTA (3 PHASE SUPPLY)

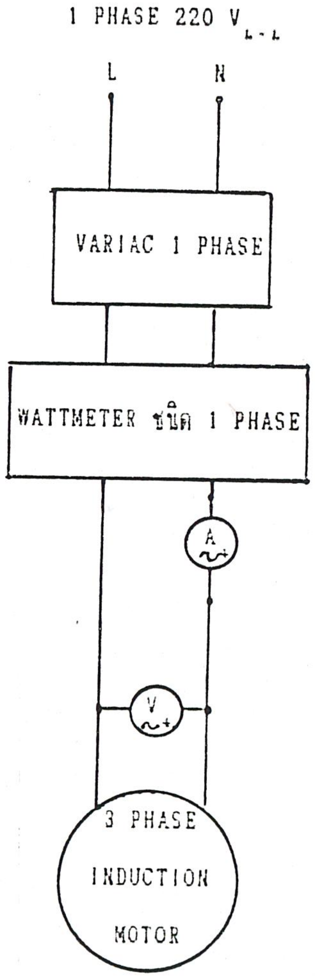
LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p (W)	% EFF
NO-LOAD1	0.001	130	0.000	0.000	0.00
NO-LOAD2	0.003	150	0.000	0.000	0.00
0.25	0.004	190	0.184	28.789	15.15
0.50	0.005	210	0.368	57.501	27.38
0.75	0.007	240	0.508	79.191	33.00
1.00	0.010	260	0.662	103.016	39.62
1.25	0.011	290	0.839	130.311	44.93
1.50	0.014	316	1.030	159.599	50.51
1.75	0.015	336	1.207	186.832	55.60
2.00	0.016	370	1.391	215.021	58.11
2.25	0.019	390	1.508	232.592	59.64
2.50	0.021	420	1.685	259.293	61.74
2.75	0.022	450	1.861	286.078	63.57
3.00	0.025	480	2.038	312.362	65.08
3.25	0.026	516	2.207	337.835	65.47
3.50	0.029	538	2.303	351.510	65.34
3.75	0.031	568	2.479	377.683	66.49
4.00	0.032	600	2.649	402.905	67.15
4.25	0.035	640	2.833	429.401	67.09
4.50	0.038	660	3.009	454.908	68.93
4.75	0.043	696	3.193	480.372	69.02
5.00	0.047	730	3.377	505.921	69.30
5.25	0.049	776	3.554	530.885	68.41
5.50	0.051	796	3.730	556.483	69.91
5.75	0.052	840	3.907	582.006	69.29
6.00	0.055	870	4.194	622.556	71.56
6.25	0.059	896	4.326	639.496	71.37
6.50	0.063	930	4.488	661.072	71.08
6.75	0.066	950	4.672	685.718	72.18

การทดลองที่ 3 การพิจารณาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส โดยขดลวดที่ stator ไม่ต่อเฟสบาลานซ์เซอร์

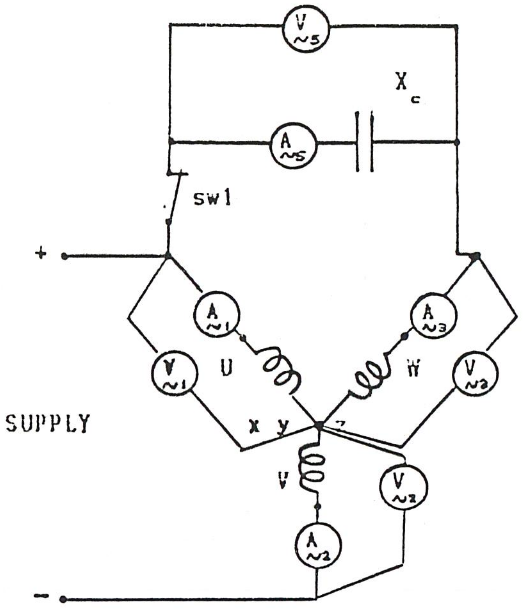
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อรับภาระทางกล โดยได้รับแหล่งจ่ายไฟชนิด 1 เฟส โดยขดลวดที่ stator ไม่ต่อเฟสบาลานซ์เซอร์
2. สามารถเปรียบเทียบการทำงานและคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟสระหว่างการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์และไม่ต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ขณะรับภาระทางกล

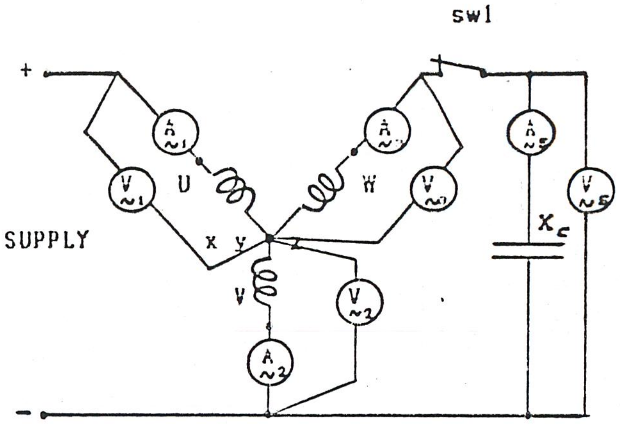
วงจรในการทดลอง



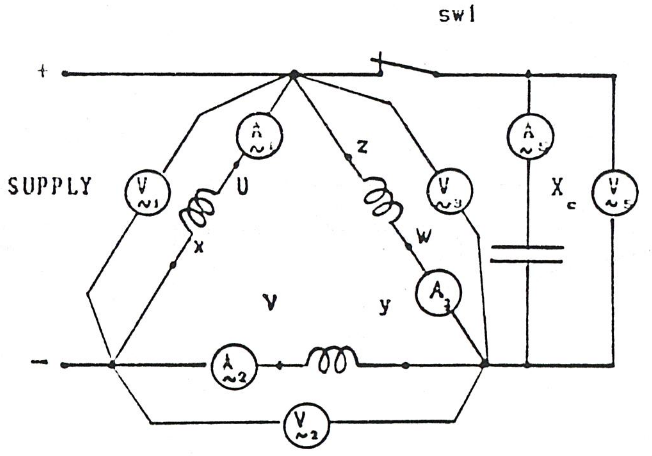
รูปที่ 11



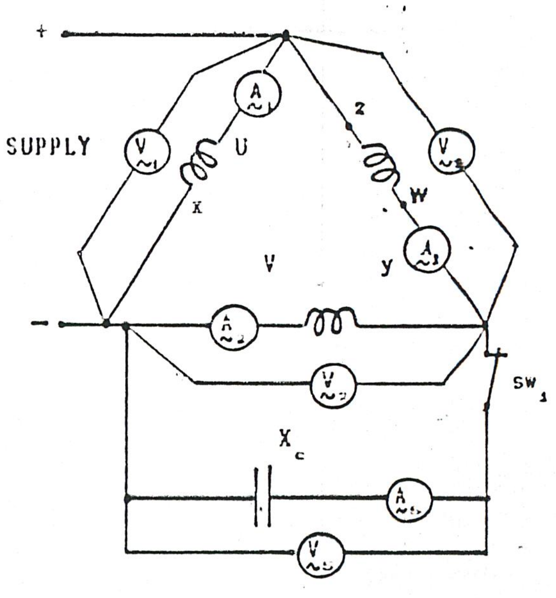
STAR แบบที่ 1



STAR แบบที่ 2



DELTA แบบที่ 1



DELTA แบบที่ 2

รูปที่ 11 (ต่อ) แสดงการต่อขดลวด stator และเฟสบาลานซ์เซอร์ แบบต่าง ๆ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.	มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า	1	ชุด
2.	ชุดตาชั่งแขวนพร้อมชุดโหลด	1	ชุด
3.	ชุดเฟสบาลานซ์เซอร์ (ชุด capacitors)	1	ชุด
4.	AC ampmeter 0-5 A	5	ตัว
5.	AC voltmeter 0-300 V	5	ตัว
6.	multimeter	1	ตัว
7.	variac 1-ϕ	1	ตัว
8.	junction box	3	ชุด
9.	wattmeter 1 เฟส	1	ชุด
10.	wire	60	เส้น
11.	tachometer	1	ตัว

วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรทดลองดังรูป (stator ต่อแบบ starแบบที่ 1)โดยเลือกใช้ขนาดของคาปาซิเตอร์ขนาด 15 ไมโครฟารัด (การเลือกขนาดของคาปาซิเตอร์จะต้องคำนึงถึงกระแสขณะสตาร์ท) และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 V.(V_{L-L}) ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส
2. ทำการทดลองแบบ no load ก่อน เพื่อตรวจสอบว่าทิศทางการหมุนของมอเตอร์ว่าถูกทิศทางหรือไม่ (ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ต้องทำให้เกิดแรงยกโหลดภาระ)
3. เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ในช่วง steady state ทำการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากวงจร
4. ทำการเพิ่มภาระที่โหลดค่าต่าง ๆ (load) วัดค่า Power Input, กระแส,แรงดันไฟฟ้า, ความเร็วรอบ จนกระทั่งกระแสที่เฟสของขดลวด stator ถึง rated current ที่ nameplate
5. บันทึกผลในตาราง
6. คำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงบิด ,Power Output และ ประสิทธิภาพ
7. ต่อวงจรทดลองดังรูป (stator ต่อแบบ delta แบบที่ 1)โดยเลือกใช้ขนาดของคาปาซิเตอร์ขนาด 30 ไมโครฟารัด(การเลือกขนาดของคาปาซิเตอร์จะต้องคำนึง

ถึงกระแสขณะสตาร์ท) และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 V. (V_{L-L})ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

8. ทำการทดลองดังข้อ 2 ถึงข้อ 6

ผลการทดลอง

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 1

ขณะสตาร์ทด้วยคาปาซิเตอร์ กระแสไหลเข้าคาปาซิเตอร์ 1.40 A.

LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
	V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3			
NO-LOAD ไม่มีเชือก มี C	220	0.23	126	137	169	0.80	0.50	1.30	120	1498	0
NO-LOAD ไม่มีเชือก ไม่มี C	220	0.80	110	120	93	0.90	0.90	0.00	56	1498	0
NO-LOAD มีเชือก	220	0.82	106	118	90	0.90	0.92	0.00	60	1498	0
0.25	220	0.96	102	124	88	0.96	0.99	0.40	130	1475	0.25
0.50	220	1.00	100	125	87	1.02	1.06	0.00	160	1463	0.49
0.75	220	1.16	99	126	85	1.14	1.18	0.00	200	1452	0.74
1.00	220	1.22	97	127	84	1.22	1.30	0.00	240	1437	0.90
1.25	220	1.40	95	128	81	1.40	1.42	0.00	280	1418	1.10
1.50	220	1.60	94	128	78	1.60	1.62	0.00	320	1400	1.32
1.75	220	1.82	91	128	72	1.84	1.90	0.00	400	1361	1.56
2.00	220	2.38	88	126	63	0.75	2.38	0.00	450	1297	1.81

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 2

จากการทดลองปรากฏว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสจะหมุนทิศทางตรงกันข้ามกันกับกรณีขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 1

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 1

ขณะลดการทำงานคาปาซิเตอร์ กระแสไหลเข้าคาปาซิเตอร์ 2.2 A.

LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
	V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3			
NO-LOAD ไม่มีเชือก มี C	220	0.82	220	214	241	0.90	0.82	0.82	145	1498	0
NO-LOAD ไม่มีเชือก ไม่มี C	220	3.18	220	180	198	1.10	1.05	1.05	160	1497	0
NO-LOAD มีเชือก	220	3.18	220	180	196	1.10	1.05	1.05	190	1492	0
0.25	220	3.18	220	180	196	1.10	1.05	1.05	220	1490	0.25
0.50	220	3.18	220	180	194	1.10	1.05	1.05	245	1486	0.49
0.75	220	3.18	220	180	192	1.12	1.05	1.05	275	1483	0.68
1.00	220	3.20	220	180	190	1.12	1.08	1.08	305	1478	0.91
1.25	220	3.20	220	180	188	1.14	1.10	1.10	330	1475	1.15
1.50	220	3.22	220	180	186	1.18	1.10	1.10	365	1474	1.32
1.75	220	3.22	220	180	183	1.19	1.12	1.12	395	1470	1.55
2.00	220	3.24	220	180	181	1.19	1.16	1.16	428	1465	1.78
2.25	220	3.40	220	179	179	1.20	1.18	1.18	460	1459	1.97
2.50	220	3.54	220	179	178	1.20	1.18	1.18	490	1455	2.20
2.75	220	3.60	220	180	177	1.20	1.18	1.18	530	1452	2.45
3.00	220	3.60	220	180	176	1.22	1.20	1.20	560	1447	2.68
3.25	220	3.70	220	180	174	1.24	1.21	1.21	595	1443	2.93

LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A.)			$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
	V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3			
3.50	220	3.80	220	179	170	1.26	1.22	1.22	630	1436	3.12
3.75	220	3.90	220	179	168	1.30	1.24	1.24	670	1429	3.30
4.00	220	4.05	220	179	168	1.34	1.30	1.30	710	1420	3.52
4.25	220	4.10	220	179	165	1.38	1.36	1.36	750	1413	3.75
4.50	220	4.20	220	178	163	1.40	1.38	1.38	800	1404	3.99
4.75	220	4.60	220	177	161	1.50	1.42	1.42	860	1394	4.23
5.00	220	4.80	220	172	154	1.58	1.50	1.50	910	1382	4.47
5.25	220	5.00	220	172	152	1.60	1.60	1.60	955	1380	4.72
5.50	220	5.20	220	171	150	1.70	1.68	1.68	1030	1352	4.97
5.75	220	5.40	220	166	148	1.80	1.70	1.70	1100	1345	5.22

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 2

จากการทดลองปรากฏว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสจะหมุนทิศทางตรงกันข้ามกันกับกรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 1

- การคำนวณหา Torque Output , Power output และ Efficiency ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ กรณีขดลวด stator ต่อแบบ star และ delta

$$T_{o/p} = \Delta W * g * r \quad \text{(N-M)}$$

$$P_{o/p} = T_{o/p} * (2\pi N_r / 60)$$

$$= (\Delta W * g * r) * (2\pi N_r / 60) \quad \text{(W)}$$

$$\% \text{ Efficiency} = 100 * P_{o/p} / P_{i/p}$$

STAR (1 PHASE SUPPLY WITHOUT C)

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD1 TO C	0.001	120	0.000	0.000	0.00
NO-LOAD1 NO C	0.001	56	0.000	0.000	0.00
NO-LOAD2 NO C	0.001	60	0.000	0.000	0.00
0.25	0.017	130	0.184	28.423	21.86
0.50	0.025	160	0.361	55.255	34.53
0.75	0.032	200	0.544	82.819	41.41
1.00	0.042	240	0.662	99.686	41.54
1.25	0.055	280	0.809	120.227	42.94
1.50	0.067	320	0.971	142.441	44.51
1.75	0.093	400	1.148	163.650	40.91
2.00	0.135	450	1.332	180.947	40.21

DELTA (1 PHASE SUPPLY WITHOUT C)

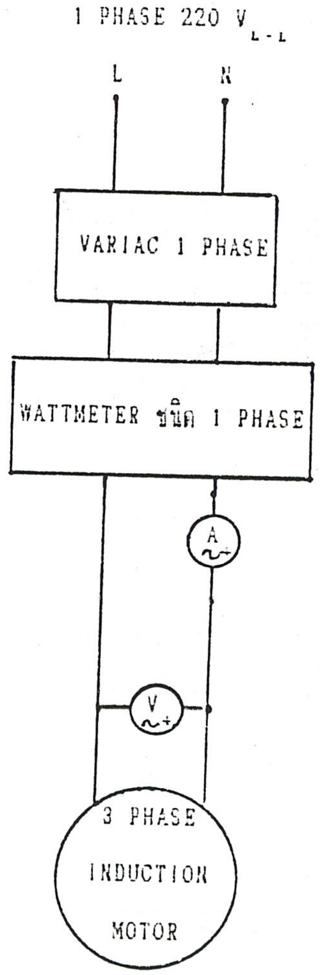
LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD1 TO C	0.001	145	0.000	0.000	0.00
NO-LOAD1 NO C	0.002	160	0.000	0.000	0.00
NO-LOAD2 NO C	0.005	190	0.000	0.000	0.00
0.25	0.007	220	0.184	28.712	13.05
0.50	0.009	245	0.361	56.124	22.91
0.75	0.011	275	0.500	77.729	28.27
1.00	0.015	305	0.670	103.669	33.99
1.25	0.017	330	0.846	130.745	39.62
1.50	0.017	365	0.971	149.970	41.09
1.75	0.020	395	1.140	175.624	44.46
2.00	0.023	428	1.310	200.998	46.96
2.25	0.027	460	1.449	221.542	48.16
2.50	0.030	490	1.619	246.779	50.35
2.75	0.032	530	1.803	274.199	51.74
3.00	0.035	560	1.972	298.908	53.38
3.25	0.038	595	2.156	325.887	54.77
3.50	0.043	630	2.296	345.337	54.82
3.75	0.047	670	2.428	363.479	54.25
4.00	0.053	710	2.590	385.270	54.26
4.25	0.058	750	2.759	408.420	54.46
4.50	0.064	800	2.936	431.791	53.97
4.75	0.071	860	3.112	454.503	52.85
5.00	0.079	910	3.289	476.156	52.32
5.25	0.080	955	3.473	502.059	52.57
5.50	0.099	1030	3.657	517.925	50.28
5.75	0.103	1100	3.841	541.161	49.20

การทดลองที่ 4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและเฟสบาลานซ์เซอร์ค่าต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟสที่สภาวะการทำงานโดย slip คงที่ และการหาความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสกับการต่อขดลวด stator และการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์แบบต่างๆ

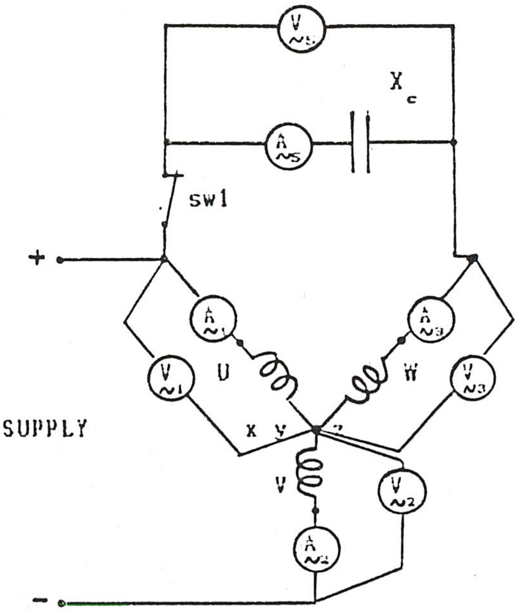
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส กับการต่อขดลวดที่ stator และการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์แบบต่างๆ
2. ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและเฟสบาลานซ์เซอร์ค่าต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟชนิด 1เฟสและประยุกต์โดยทำการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ค่าต่างๆ
3. สามารถเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์และการต่อขดลวด stator แบบต่างๆ ได้

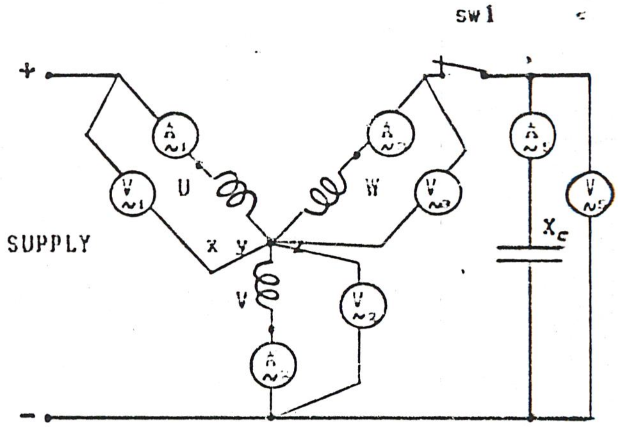
วงจรในการทดลอง



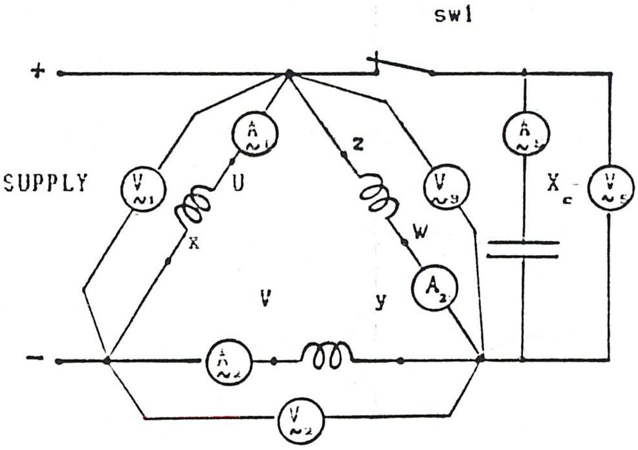
รูปที่ 12



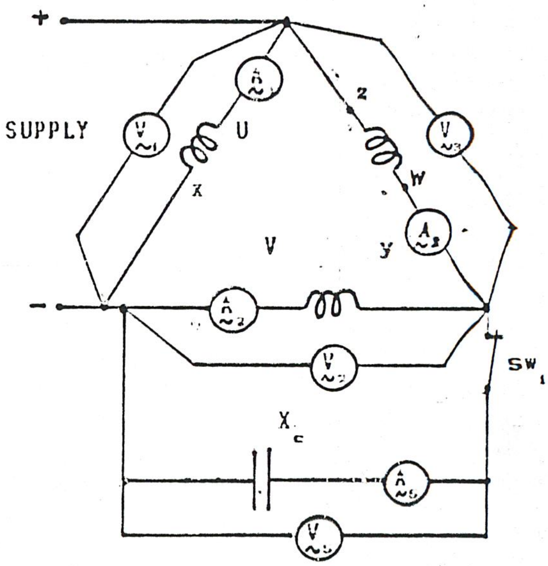
STAR แบบที่ 1



STAR แบบที่ 2



DELTA แบบที่ 1



DELTA แบบที่ 2

รูปที่ 12 (ต่อ) แสดงการต่อขดลวด stator และเฟสบาลานซ์เซอร์ แบบต่าง ๆ

<u>อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง</u>

1.	มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า	1	ชุด
2.	ชุดตาชั่งแขวนพร้อมชุดโหลด	1	ชุด
3.	ชุดเฟสบาลานซ์เซอร์ (ชุด capacitors)	1	ชุด
4.	AC ampmeter 0-5 A	5	ตัว
5.	AC voltmeter 0-300 V	5	ตัว
6.	multimeter	1	ตัว
7.	variac 1-φ	1	ตัว
8.	junction box	3	ชุด
9.	wattmeter 1 เฟส	1	ชุด
10.	wire	70	เส้น
11.	tachometer	1	ตัว
12.	resistor สำหรับวัดกระแส	1	ชุด
13.	oscilloscope (พร้อม probe 2 เส้น)	1	ชุด

<u>วิธีการทดลอง</u>

1. ต่อวงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยขดลวดที่สเตเตอร์ ต่อแบบต่างๆ ดังรูป โดยที่ขนาดของคาปาซิเตอร์จะต้องคำนึงถึงกระแสสตาร์ทและสามารถทำให้มอเตอร์ 3 เฟสสามารถหมุนได้เมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส
2. ทำการทดลองโดยให้มอเตอร์หมุนจนกระทั่งมอเตอร์เข้าสู่สภาวะ steady state วัดค่ามุมระหว่างกระแสแต่ละเฟสโดย oscilloscope บันทึกผลการทดลอง
3. ต่อวงจรทดลองดังรูป (stator ต่อแบบ star แบบที่ 1) โดยเลือกใช้ขนาดของคาปาซิเตอร์ค่าต่างๆ ทำการต่อโหลดภาระให้แก่มอเตอร์ ซึ่งการต่อคาปาซิเตอร์จะต้องถูกปรับไปภายใต้เงื่อนไข slip คงที่ และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 V. (V_{L-L}) ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส
4. ทำการทดลองแบบ no load ก่อน เพื่อตรวจสอบว่าทิศทางการหมุนของมอเตอร์ว่าถูกทิศทางหรือไม่ (ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ต้องทำให้เกิดแรงยกโหลดภาระ)
5. ในการปรับค่าคาปาซิเตอร์และเพิ่มภาระที่โหลดค่าต่าง ๆ (load) วัดค่า Power Input, กระแส, แรงดันไฟฟ้า, ความเร็วรอบ

6. บันทึกผลในตาราง
7. คำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงบิด ,Power Output และ ประสิทธิภาพ
8. ทำการทดลองดังข้อ 2 ถึงข้อ 5 โดยทำการต่อวงจรโดยขดลวดที่ stator ต่อแบบ star แบบที่ 2 , delta แบบที่ 1 , delta แบบที่ 2 ตามลำดับ

ผลการทดลอง

การทดลองในการศึกษาทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส

กรณี การต่อขดลวด stator	ขนาด C(uF)	มุมเฟสของกระแส (องศา)
ต่อแบบ star แบบที่ 1	5.00	I_2 นำ I_1 เท่ากับ 64 องศา I_3 นำ I_1 เท่ากับ 120 องศา
ต่อแบบ star แบบที่ 2	5.00	I_1 นำ I_2 เท่ากับ 40 องศา I_3 นำ I_1 เท่ากับ 72 องศา
ต่อแบบ delta แบบที่ 1	45.00	I_1 นำ I_2 เท่ากับ 72 องศา I_2 นำ I_3 เท่ากับ 70.2 องศา
ต่อแบบ delta แบบที่ 2	10.00	I_2 นำ I_1 เท่ากับ 19.8 องศา I_3 นำ I_2 เท่ากับ 126 องศา

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและค่าเฟสบาลานซ์เซอร์

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 1

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C	$P_{t/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_5			
SLIP=	0	0.09	220	0.84	104	121	89	0.88	0.96	0.00	0.0	90	1491.1	0.09
0.006	5	0.09	220	0.62	108	122	104	0.80	0.70	0.30	0.36	100	1491.2	0.08
(C=10	10	0.10	220	0.42	125	132	158	0.74	0.50	1.00	1.12	110	1491.2	0.09
μF)	15	0.10	220	0.52	126	138	168	0.78	0.58	1.30	1.4	130	1490.3	0.09
	20	0.10	220	0.82	124	149	185	0.98	0.89	1.98	1.92	180	1490.5	0.09
	25	0.10	220	1.30	120	160	188	1.20	1.36	2.36	2.42	260	1490.3	0.48

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_n (V.)			I_n (A)			วงจร C	$P_{t/n}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_5			
SLIP=	0	0.50	220	1.00	100	125	86	1.02	1.04	0.00	0.0	160	1460.4	0.62
0.026	5	0.65	220	0.80	109	128	116	0.80	0.80	0.40	0.48	170	1463.0	0.81
(C=15	10	0.85	220	0.80	111	134	134	0.60	0.84	0.82	0.94	200	1461.0	0.94
μF)	15	1.00	220	0.92	110	140	149	0.44	0.98	1.04	1.15	220	1462.6	1.00
	20	1.10	220	1.20	114	152	124	0.42	1.20	1.60	1.75	280	1462.9	1.17
	25	1.25	220	1.60	110	162	186	0.60	1.60	2.10	2.2	370	1461.0	1.45
SLIP=	0	0.85	220	1.22	97	126	83	1.20	1.24	0.00	0.0	230	1438.0	0.83
0.041	10	1.35	220	1.10	106	134	126	0.80	1.18	0.78	0.86	270	1439.0	1.31
(C=20	15	1.50	220	1.20	106	138	135	0.62	1.20	0.98	1.06	290	1438.0	1.75
μF)	20	1.85	220	1.42	102	142	154	0.30	1.50	1.38	1.44	360	1437.0	1.90
	25	2.00	220	1.80	102	162	176	0.20	1.82	1.84	2.0	440	1439.0	1.90
	30	2.00	220	2.20	100	170	187	0.58	2.22	2.40	2.5	520	1438.0	2.32
SLIP=	0	1.50	220	1.44	96	129	80	1.44	1.50	0.00	0.0	290	1410.8	1.49
0.059	15	1.88	220	1.40	104	138	129	0.82	1.42	0.92	1.0	350	1413.0	1.78
(C=25	20	2.25	220	1.62	100	146	145	0.60	1.64	1.24	1.39	410	1411.0	2.09
μF)	25	2.50	220	1.96	96	158	163	0.30	1.98	1.66	1.78	480	1413.0	2.40
	30	2.60	220	2.30	93	168	175	0.30	2.38	2.10	2.2	570	1412.0	2.44

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 2

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_n (V.)			I_n (A)			วงจร C	$P_{t/n}$ (W)	N_R (RPM)	Δw = $w_2 - w_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_5			
SLIP=	0	0.30	220	0.98	106	118	87	0.99	1.00	0.00	0.0	135	1471.2	0.30
0.019	1	0.30	220	0.92	106	119	89	0.96	0.99	0.08	0.08	130	1471.2	0.30
(C= 1	3	0.30	220	0.80	107	122	95	0.80	0.90	0.18	0.2	130	1472.2	0.30
μF)	5	0.60	220	0.72	110	128	118	0.76	0.80	0.40	0.48	150	1471.9	0.59
	10	0.65	220	0.72	116	131	139	0.76	0.60	0.84	0.95	180	1470.9	0.64
SLIP=	0	0.10	220	0.90	105	120	88	0.96	0.98	0.00	0.0	110	1479.8	0.10
0.012	1	0.10	220	0.82	105	121	90	0.84	0.96	0.49	0.2	110	1481.7	0.10
(C= 3	3	0.10	220	0.78	105	122	95	0.78	0.82	0.16	0.49	100	1481.3	0.10
μF)	5	0.25	220	0.60	108	130	121	0.62	0.80	0.48	0.55	120	1480.5	0.25
	10	0.30	220	0.60	128	118	152	0.60	0.62	0.96	1.05	140	1480.7	0.30
SLIP=	0	0.01	220	0.84	103	120	88	0.88	0.92	0.00	0.0	90	1489.0	0.01
0.007	2	0.01	220	0.78	101	123	93	0.80	0.84	0.09	0.15	90	1489.2	0.01
(C= 5	5	0.01	220	0.50	102	134	121	0.50	0.78	0.54	0.6	80	1489.6	0.01
μF)	10	0.05	220	0.40	114	143	158	0.42	0.78	1.00	1.1	110	1489.4	0.05
	15	0.05	220	0.50	120	143	168	0.52	0.82	1.28	1.4	130	1489.4	0.05
	20	0.01	220	0.80	130	142	184	0.80	1.04	1.80	1.9	170	1489.9	0.01

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 1

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $W_2 - W_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_3	I_5			
SLIP=	0	0.25	220	3.10	205	178	192	2.00	1.10	1.08	192	0.0	215	1490.2	0.25
0.007	5	0.50	220	2.24	206	192	208	1.63	0.88	1.10	208	1.0	210	1489.0	0.43
(C=30	10	0.50	220	2.02	207	198	197	1.60	0.90	1.22	197	1.2	210	1490.3	0.43
μF)	15	0.50	220	2.22	206	192	208	1.64	0.88	1.10	208	0.9	205	1489.3	0.43
	20	0.50	220	2.08	205	197	195	1.54	0.90	1.20	195	1.2	200	1489.6	0.43
	30	0.75	220	1.80	202	215	232	1.38	0.90	1.60	232	2.3	245	1489.1	0.67
	35	0.75	220	1.60	205	225	241	1.30	1.80	1.80	241	2.8	260	1489.0	0.67
	45	0.75	220	1.40	206	242	253	1.20	1.40	2.30	253	3.78	305	1489.6	0.67
SLIP=	0	1.00	220	3.10	204	177	186	2.00	1.10	1.10	180	0.0	300	1480.7	0.99
0.013	25	1.50	220	2.00	203	205	217	1.40	1.00	1.30	217	1.6	325	1480.4	1.25
(C=35	30	1.50	220	2.00	203	214	223	1.25	1.10	1.40	223	2.0	325	1480.4	1.27
μF)	35	1.50	220	1.70	204	225	234	1.20	1.20	1.60	234	2.8	300	1480.0	1.29
	40	1.75	220	1.80	204	234	236	1.15	1.45	1.70	236	3.12	400	1480.3	1.47
	45	1.75	220	1.90	203	242	243	1.10	1.70	2.00	243	3.6	400	1480.6	1.45
SLIP=	0	1.50	220	3.22	204	179	182	2.10	1.18	1.10	182	0.0	375	1471.5	1.40
0.019	25	2.10	220	2.38	205	208	233	1.52	1.18	1.22	233	1.6	395	1471.1	1.91
(C=40	30	2.00	220	2.20	203	214	218	1.38	1.20	2.00	218	2.0	400	1470.5	1.88
μF)	35	2.50	220	2.18	204	222	223	1.24	1.28	1.40	223	2.42	440	1470.4	2.30
	40	2.50	220	2.18	203	230	229	1.20	1.58	1.56	229	3.0	444	1471.7	2.32
	45	2.50	220	2.30	203	240	235	1.10	1.80	1.70	235	3.2	500	1471.4	2.32
	50	2.50	220	2.40	203	248	242	1.00	2.00	2.00	242	4.0	505	1471.7	2.31
SLIP=	0	2.25	220	3.50	205	181	180	2.30	1.20	1.08	180	0.0	460	1461.7	2.05

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_n (V.)			I_n (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_4 - W_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
0.025	30	3.00	220	2.60	204	234	213	1.50	1.30	1.20	213	2.0	500	1462.0	2.80
(C=45	35	3.10	220	2.50	206	222	220	1.45	1.40	1.30	220	2.4	550	1462.4	3.00
μF)	40	3.50	220	2.40	211	226	220	1.20	1.60	1.40	220	2.8	550	1462.2	3.10
	45	3.75	220	2.80	204	235	226	1.20	1.80	1.50	226	3.2	585	1462.5	3.35
	50	3.50	220	2.80	203	245	232	1.00	2.08	1.70	232	3.6	600	1461.4	3.31
	55	3.50	220	3.00	205	255	240	1.00	2.20	2.00	240	4.2	630	1461.9	3.31
SLIP=	0	2.75	220	3.68	202	180	175	2.40	1.28	1.20	175	0.0	540	1453.0	2.57
0.031	35	3.75	220	2.80	205	220	214	1.50	1.50	1.20	214	2.4	590	1452.8	3.44
(C=50	40	3.75	220	2.80	204	227	219	1.40	1.70	1.40	219	2.8	590	1452.9	3.45
μF)	45	4.25	220	2.90	206	234	222	1.30	1.90	1.70	222	3.2	660	1453.3	3.85
	50	4.50	220	3.20	207	244	228	1.40	2.20	1.60	228	3.6	700	1452.8	4.12
	55	4.25	220	3.30	204	253	234	1.20	2.40	1.82	234	4.1	720	1452.8	3.95

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 2

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_n (V.)			I_n (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_3 - W_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
SLIP=	0	0.00	220	3.20	206	194	177	1.98	1.08	1.01	194	0.0	180	1495.4	0.00
	1	1.75	220	3.22	205	184	180	2.12	1.18	1.10	184	0.08	390	1468.7	1.71
(C= 1	2	2.00	220	3.22	204	183	181	2.16	1.18	1.09	183	0.12	415	1467.9	1.81
μF)	3	1.75	220	3.18	205	186	182	2.40	1.14	1.08	186	0.18	385	1468.6	1.65

SLIP	C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $W_2 - W_1$ (kg)
			V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
	4	1.75	220	3.18	206	186	183	2.80	1.16	1.04	186	0.24	390	1468.0	1.65
	5	1.75	220	3.20	205	187	183	2.00	1.10	1.00	187	0.3	382	1469.0	1.67
SLIP=	0	0.75	220	3.08	204	188	177	2.00	1.10	1.06	188	0.0	270	1481.3	0.75
	5	1.00	220	2.34	205	204	192	1.62	1.16	0.82	204	0.98	268	1481.3	0.99
(C=10	10	1.00	220	2.20	205	204	191	1.62	1.14	0.82	204	0.98	268	1481.8	0.99
μF)	15	1.00	220	2.30	205	204	191	1.60	1.12	0.82	204	0.98	267	1481.6	0.99
	20	1.00	220	2.20	205	210	199	1.52	1.20	0.96	210	1.2	270	1482.3	0.99
	25	1.03	220	2.40	205	199	206	1.40	1.38	1.20	199	1.6	280	1482.8	1.02
SLIP=	0	0.25	220	3.00	203	191	175	1.96	1.06	1.02	191	0.01	210	1490.0	0.25
	5	0.25	220	2.18	203	208	189	1.60	1.16	0.78	208	1.05	180	1490.2	0.25
(C=15	10	0.50	220	2.00	203	213	195	1.50	1.22	0.82	213	1.32	197	1489.7	0.49
μF)	15	0.60	220	2.20	205	208	190	1.62	1.16	0.80	208	1.05	195	1490.5	0.49
	20	0.50	220	2.00	204	215	196	1.56	1.22	0.82	215	1.34	205	1489.5	0.49
	25	0.50	220	1.84	205	226	206	1.42	1.42	0.90	226	1.85	208	1490.3	0.49

- การคำนวณหา Torque Output , Power Output และ Efficiency ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 1 และ 2 delta แบบที่ 1 และ 2

$$T_{o/p} = \Delta W * g * r \quad (N\text{-}M)$$

$$P_{o/p} = T_{o/p} * (2\pi N_r / 60)$$

$$= (\Delta W * g * r) * (2\pi N_r / 60) \quad (W)$$

$$\%\ Efficiency = 100 * P_{o/p} / P_{i/p}$$

STAR (1 PHASE SUPPLY WITH C)

STAR CASE 1

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
C 10 uF FIX SLIP=0.006					
0.05(C= 0 uF)	0.006	90	0.066	10.338	11.49
0.09(C= 5 uF)	0.006	100	0.059	9.195	9.20
0.10(C=10 uF)	0.006	110	0.066	10.345	9.40
0.10(C=15 uF)	0.006	130	0.066	10.338	7.95
0.10(C=20 uF)	0.006	180	0.066	10.340	5.74
0.10(C=25 uF)	0.006	260	0.066	10.338	3.98
C 15 uF FIX SLIP=0.026					
0.50(C= 0 uF)	0.026	160	0.353	54.031	33.77
0.65(C= 5 uF)	0.026	170	0.456	69.819	41.07
0.85(C=10 uF)	0.026	200	0.596	91.216	45.61
1.00(C=15 uF)	0.026	220	0.692	105.899	48.14
1.10(C=20 uF)	0.025	280	0.736	112.681	40.24
1.25(C=25uF)	0.026	370	0.861	131.756	35.61
C 20uF FIX SLIP=0.041					
0.85(C= 0 uF)	0.041	230	0.611	91.996	40.00
1.35(C=10 uF)	0.041	270	0.949	143.082	52.99
1.50(C=15 uF)	0.041	290	1.059	159.608	55:04
1.85(C=20 uF)	0.041	360	1.288	193.941	53.87
2.00(C=25 uF)	0.041	440	1.398	210.741	47.90
2.00(C=30uF)	0.041	520	1.398	210.594	40.50
C 25uF FIX SLIP=0.058					
1.50(C= 0 uF)	0.058	290	1.096	162.256	55.95
1.88(C= 15 uF	0.058	350	1.310	193.863	55.39
2.25(C=20 uF)	0.058	410	1.538	227.626	55.52
2.50(C=25 uF)	0.058	480	1.766	261.389	54.46
2.60(C=30 uF)	0.058	570	1.795	265.745	46.62

STAR CASE 2

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
C 1 uF FIX SLIP=0.019					
0.25(C= 0 uF)	0.019	135	0.221	34.015	25.20
0.30(C= 1 uF)	0.019	130	0.221	34.010	26.16
0.30(C= 3 uF)	0.019	130	0.221	34.043	26.19
0.60(C= 5 uF)	0.019	150	0.294	45.381	30.25
0.65(C=10 uF)	0.019	180	0.331	51.019	28.34
C 3uF FIX SLIP=0.012					
0.10(C= 0 uF)	0.012	110	0.074	11.418	10.38
0.10(C= 1 uF)	0.012	100	0.074	11.421	11.42
0.10(C= 3 uF)	0.012	110	0.074	11.418	10.38
0.25(C= 5 uF)	0.012	120	0.184	28.546	23.79
0.30(C=10 uF)	0.012	140	0.221	34.258	24.47
C 5uF FIX SLIP=0.007					
0.01(C= 0 uF)	0.007	90	0.007	1.148	1.28
0.01(C= 2 uF)	0.007	90	0.007	1.148	1.28
0.01(C= 5 uF)	0.007	80	0.007	1.148	1.44
0.05(C=10 uF)	0.007	110	0.037	5.740	5.22
0.05(C=15 uF)	0.007	130	0.037	5.740	4.42
0.01(C=20uF)	0.007	170	0.007	1.148	0.68

DELTA (1 PHASE SUPPLY WITH C)

DELTA CASE 1

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
C 30 uF FIX SLIP=0.007					
0.25(C= 0 uF)	0.007	215	0.184	28.716	13.36
0.50(C= 5 uF)	0.007	210	0.316	49.351	23.50
0.50(C=10 uF)	0.006	210	0.313	48.820	23.25
0.50(C=15 uF)	0.007	205	0.316	49.361	24.08
0.50(C=20 uF)	0.007	200	0.316	49.371	24.69
0.75(C=30 uF)	0.007	245	0.493	76.901	31.39
0.75(C=35 uF)	0.007	260	0.493	76.896	29.58
0.75(C=45 uF)	0.007	305	0.493	76.927	25.22
C 35 uF FIX SLIP=0.013					
1.00(C= 0 uF)	0.013	300	0.728	112.989	37.66
1.50(C=25 uF)	0.013	325	0.920	142.634	43.89
1.50(C=30 uF)	0.013	325	0.934	144.916	44.59
1.50(C=35 uF)	0.013	300	0.949	147.158	49.05
1.75(C=40 uF)	0.013	400	1.082	167.726	41.93
1.75(C=45 uF)	0.013	400	1.067	165.478	41.37
C 40 uF FIX SLIP=0.019					
1.50(C= 0 uF)	0.019	375	1.030	158.790	42.34
2.10(C=25 uF)	0.019	395	1.405	216.575	54.83
2.00(C=30 uF)	0.019	400	1.383	213.130	53.28
2.50(C=35 uF)	0.019	440	1.692	260.744	59.26
2.50(C=40 uF)	0.019	442	1.707	263.209	59.55
2.50(C=45 uF)	0.019	500	1.707	263.119	52.62
2.50(C=50 uF)	0.019	505	1.700	262.038	51.89
C 45 uF FIX SLIP=0.025					
2.25(C= 0 uF)	0.025	460	1.508	231.012	50.22
3.00(C=30 uF)	0.025	500	2.060	315.529	63.11
3.10(C=35 uF)	0.025	550	2.207	338.159	61.48
3.50(C=40 uF)	0.025	550	2.281	349.383	63.52
3.75(C=45 uF)	0.025	585	2.465	377.637	64.55
3.50(C=50 uF)	0.025	600	2.435	372.949	62.16
3.50(C=55 uF)	0.025	630	2.435	372.975	59.20

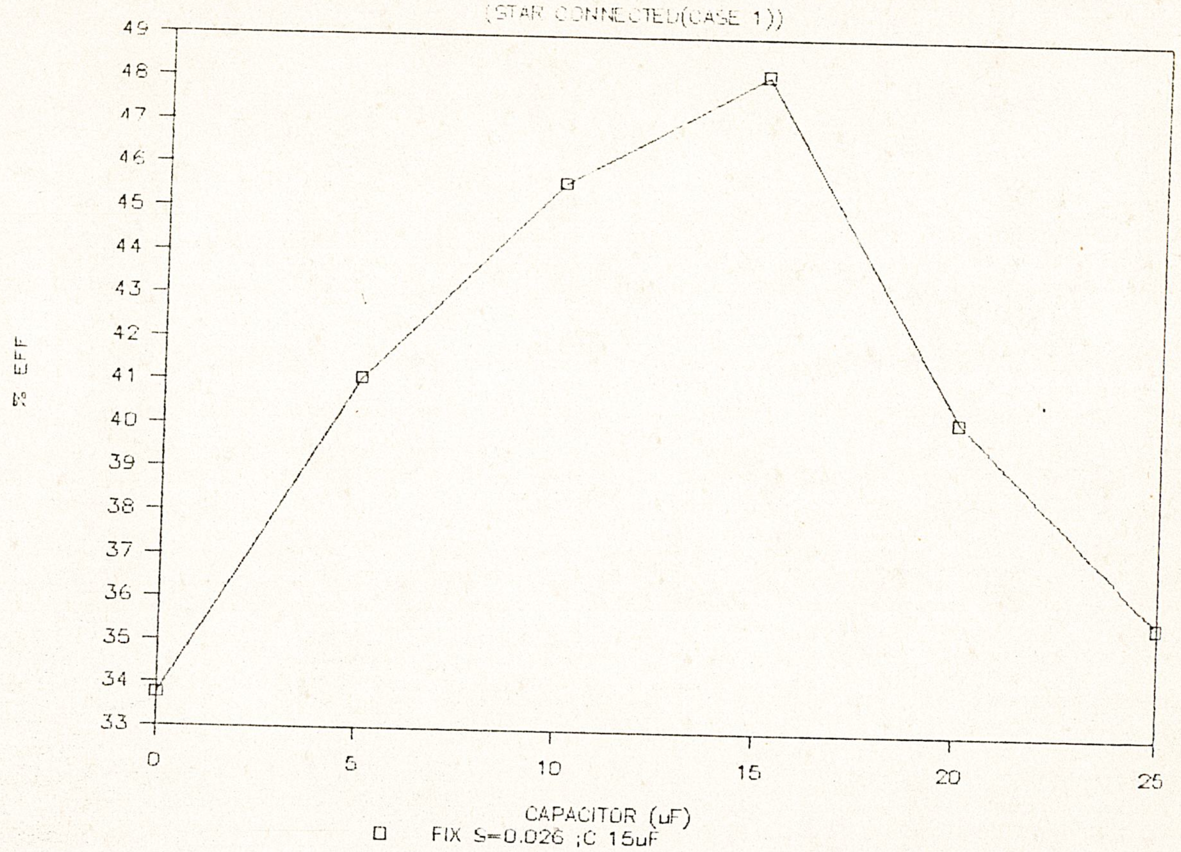
LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
C 50 uF FIX SLIP=0.031					
2.75(C= 0 uF)	0.031	540	1.891	287.828	53.30
3.75(C=35 uF)	0.031	590	2.531	385.210	65.29
3.75(C=40 uF)	0.031	590	2.538	386.357	65.48
4.25(C=45 uF)	0.031	660	2.833	431.270	65.34
4.50(C=50 uF)	0.031	700	3.031	461.357	65.91
4.25(C=55 uF)	0.031	720	2.906	442.320	61.43

DELTA CASE 2

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
C 1 uF FIX SLIP=0.021					
1.75(C= 1 uF)	0.021	390	1.258	193.581	49.64
2.00(C= 2 uF)	0.021	415	1.332	204.790	49.35
1.75(C= 3 uF)	0.021	385	1.214	186.776	48.51
1.75(C= 4 uF)	0.021	390	1.214	186.700	47.87
1.75(C= 5 uF)	0.021	382	1.229	189.091	49.50
C 10uF FIX SLIP=0.012					
0.75(C= 0 uF)	0.012	270	0.552	85.632	31.72
1.00(C= 5 uF)	0.012	268	0.714	110.751	41.33
1.00(C=10 uF)	0.012	268	0.728	113.073	42.19
1.00(C=15 uF)	0.012	269	0.728	113.058	42.03
1.00(C=20 uF)	0.012	270	0.728	113.088	41.88
1.25(C=25uF)	0.012	280	0.750	116.554	41.63
C 15uF FIX SLIP=0.007					
0.25(C= 0 uF)	0.007	210	0.184	28.712	13.67
0.25(C= 5 uF)	0.007	180	0.184	28.712	15.95
0.50(C=10 uF)	0.007	197	0.361	56.264	28.56
0.50(C=15 uF)	0.007	195	0.361	56.275	28.86
0.50(C=20 uF)	0.007	205	0.361	56.256	27.44
0.50(C=25 uF)	0.007	208	0.361	56.283	27.06

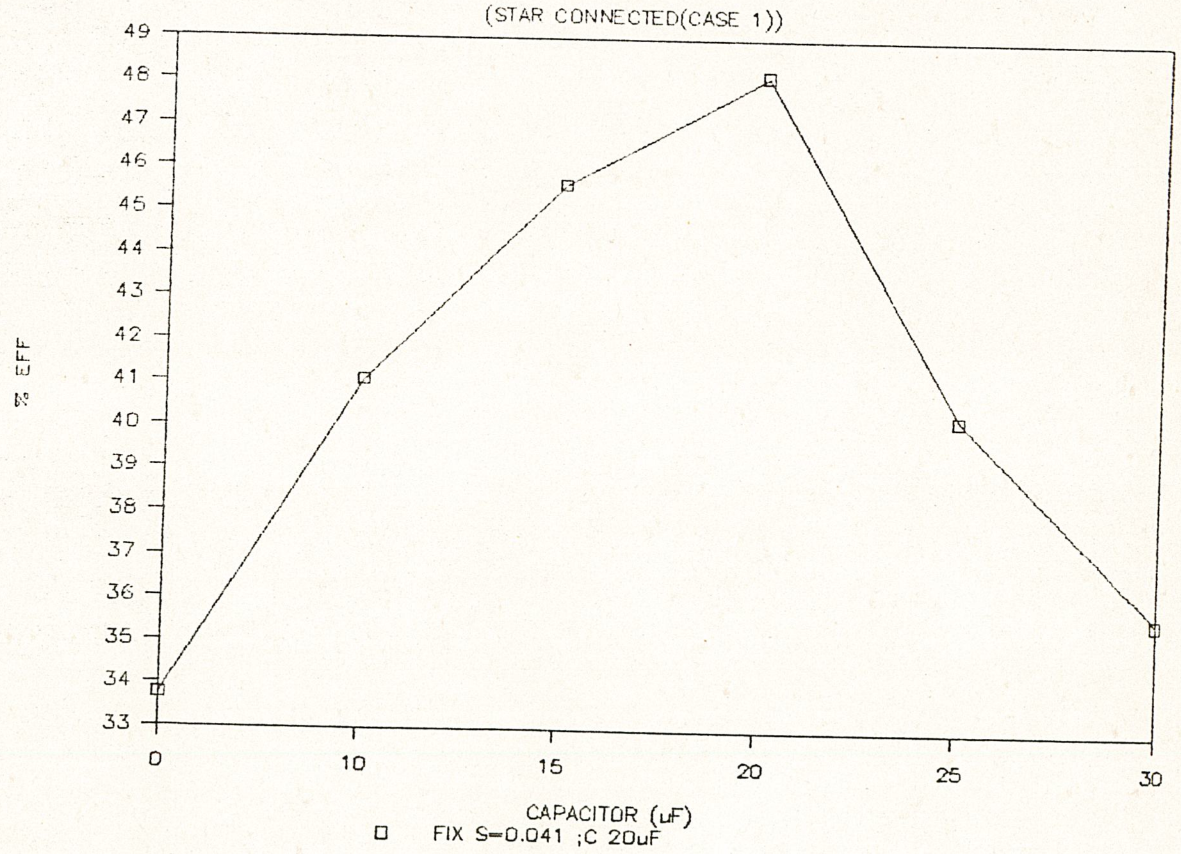
RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR

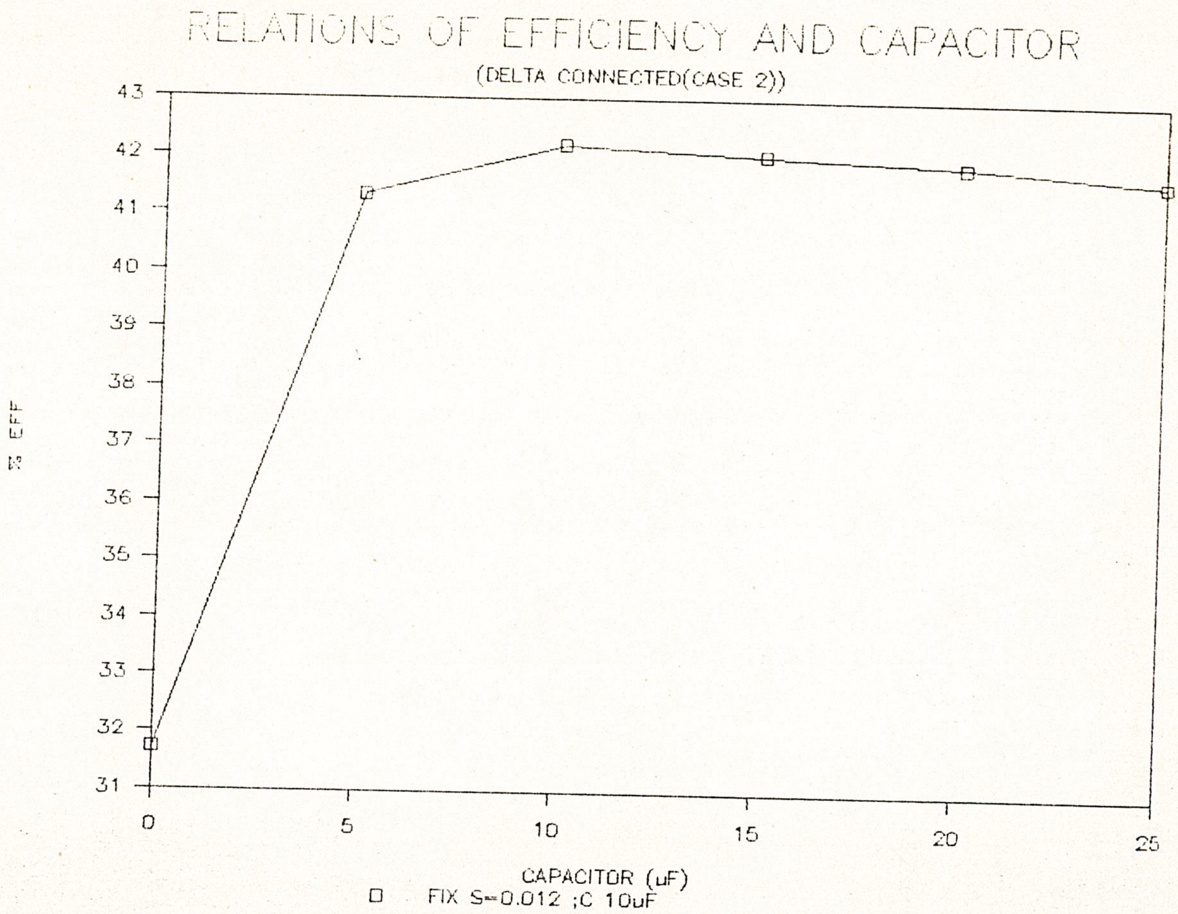
(STAR CONNECTED(CASE 1))



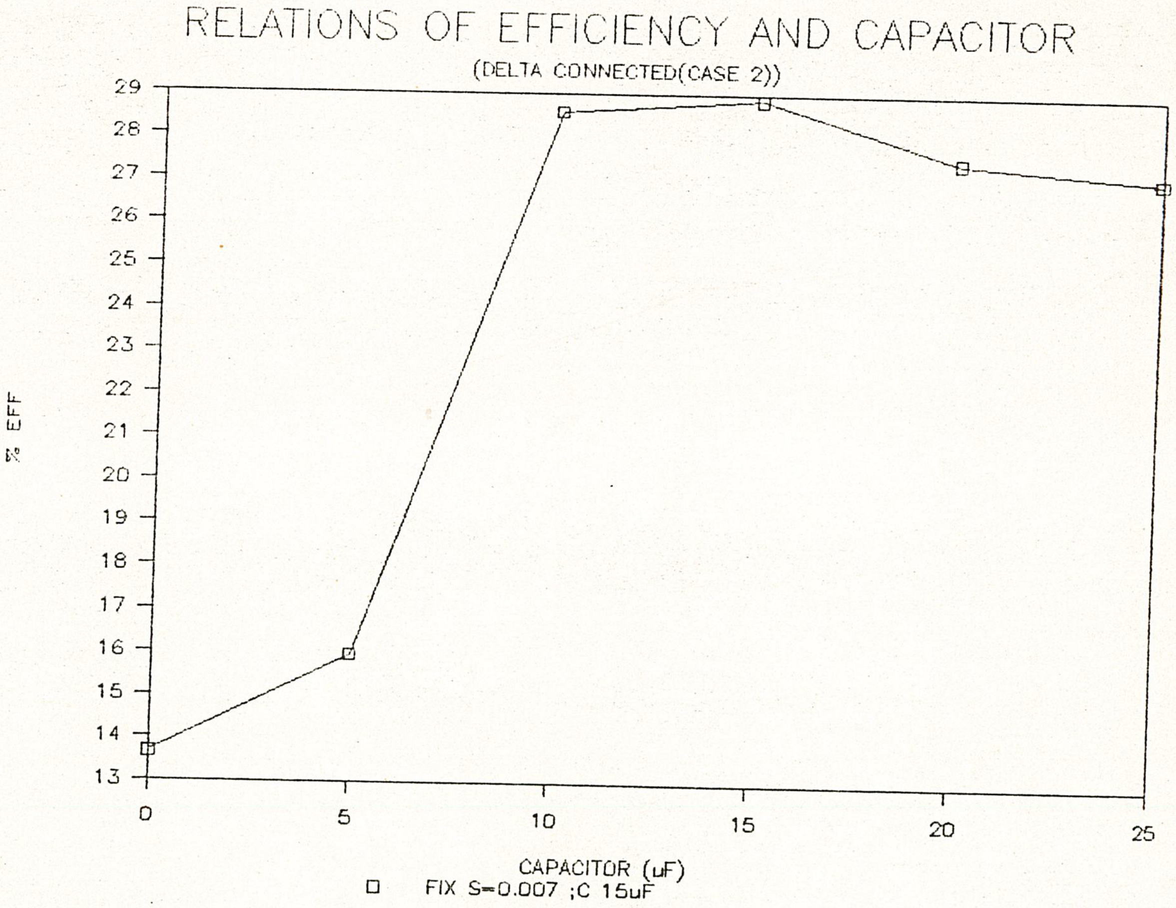
RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR

(STAR CONNECTED(CASE 1))

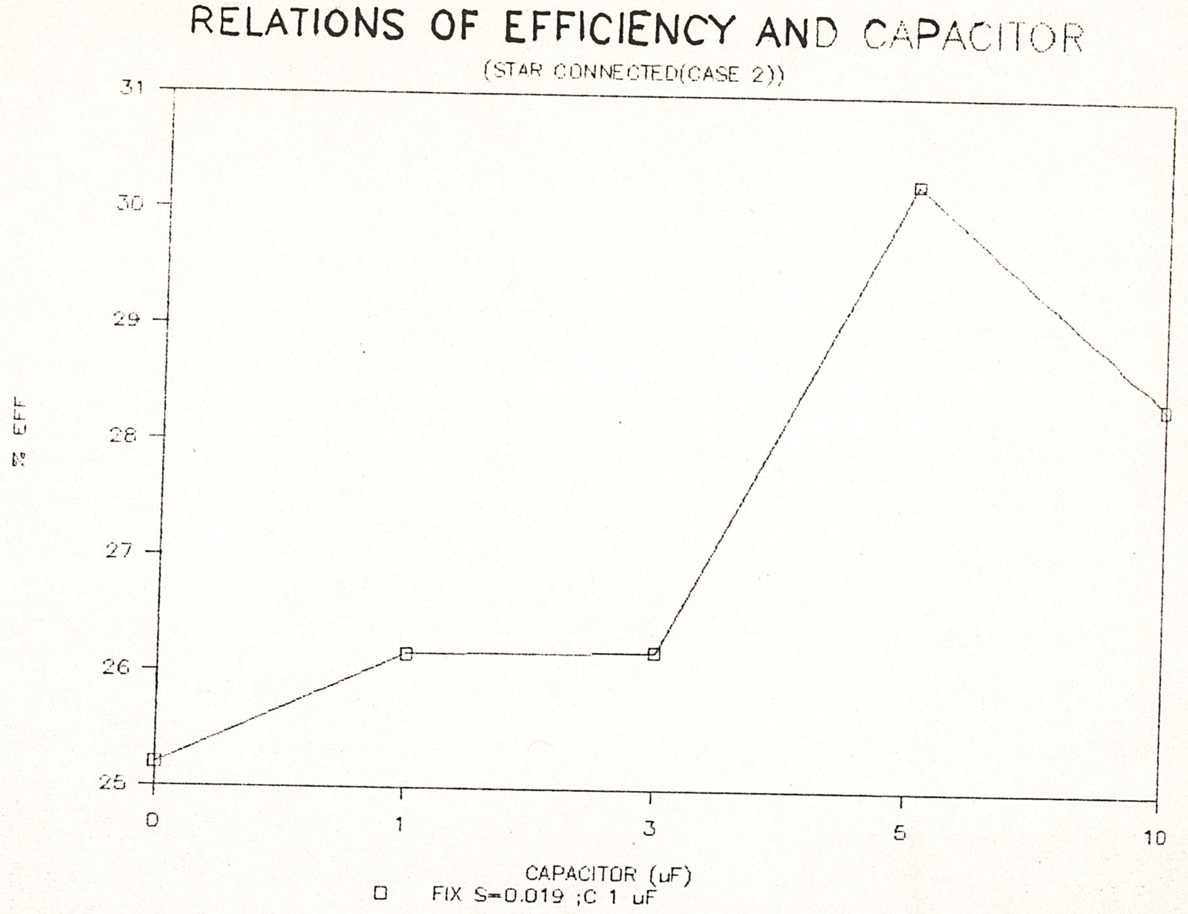




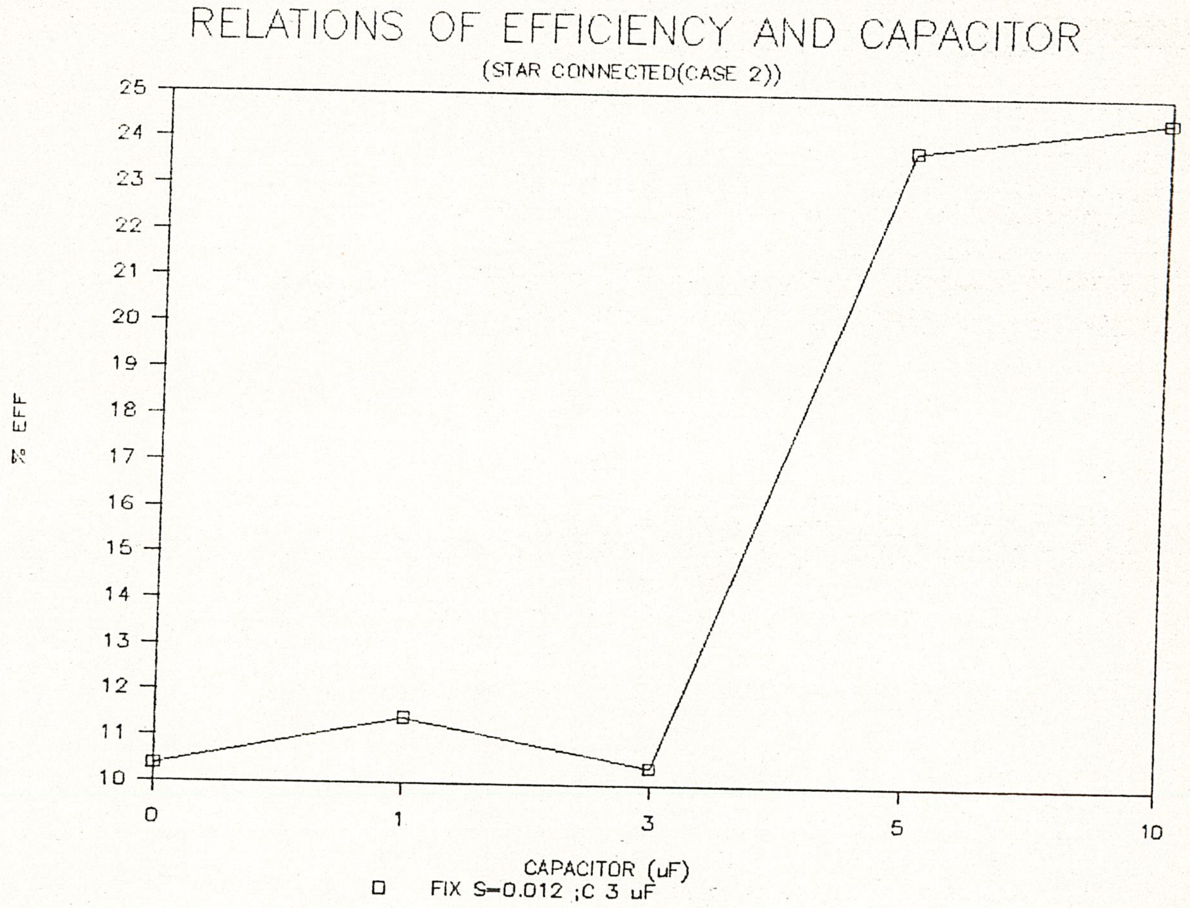
RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR
(DELTA CONNECTED(CASE 2))
43
42
41
40
39
38
37
36
35
34
33
32
31
% EFF
0
5
10
15
20
25
CAPACITOR (uF)
FIX S=0.012 ;C 10uF



RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR
(DELTA CONNECTED(CASE 2))
29
28
27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
% EFF
0
5
10
15
20
25
CAPACITOR (uF)
FIX S=0.007 ;C 15uF



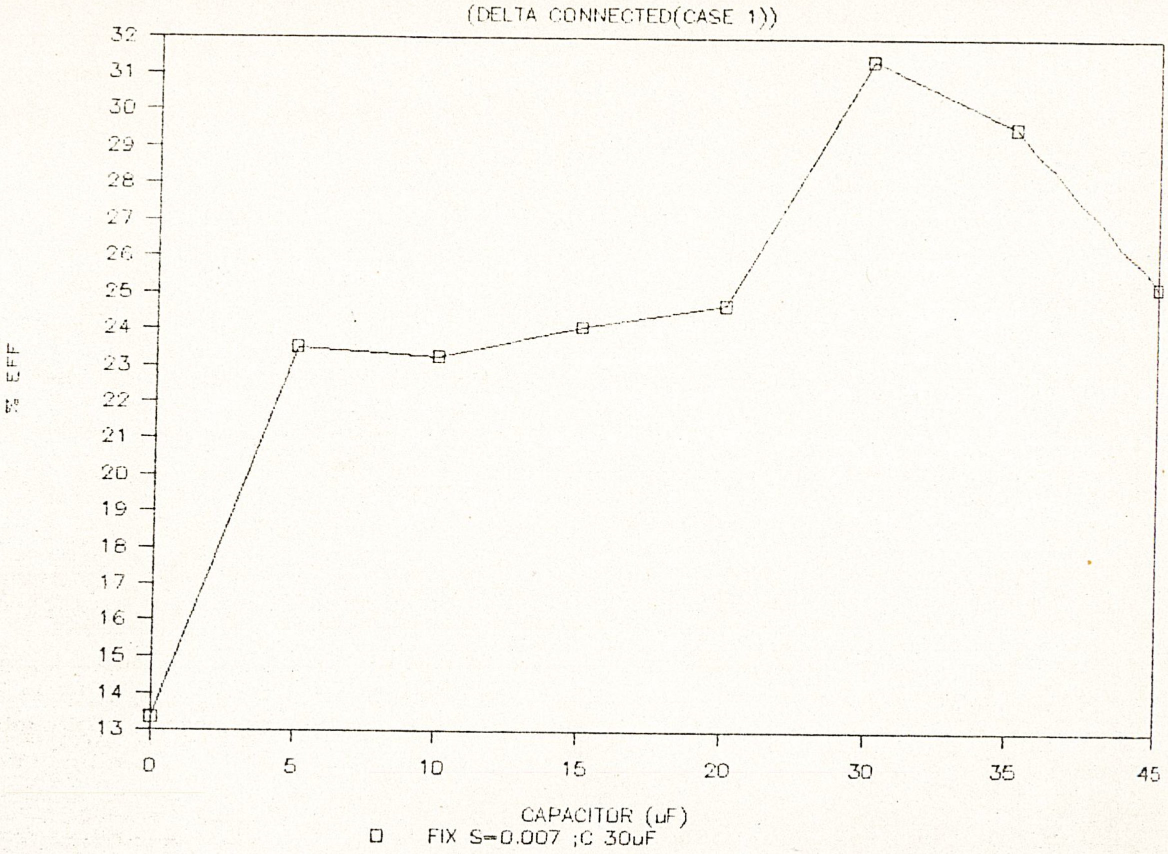
RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR
(STAR CONNECTED(CASE 2))
31
30
29
28
27
26
25
% EFF
0
1
3
5
10
CAPACITOR (uF)
FIX S=0.019 ;C 1 uF



RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR
(STAR CONNECTED(CASE 2))
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
% EFF
0
1
3
5
10
CAPACITOR (uF)
FIX S=0.012 ;C 3 uF

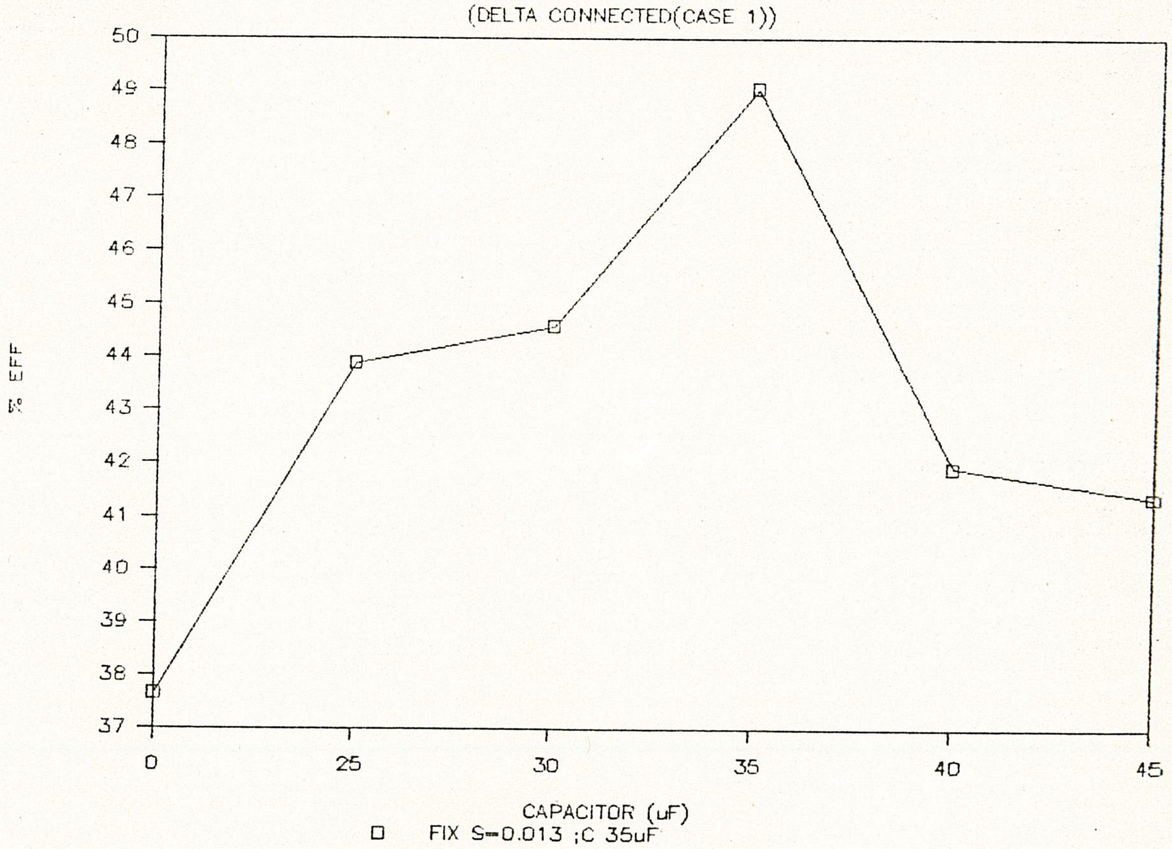
RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR

(DELTA CONNECTED(CASE 1))



RELATIONS OF EFFICIENCY AND CAPACITOR

(DELTA CONNECTED(CASE 1))

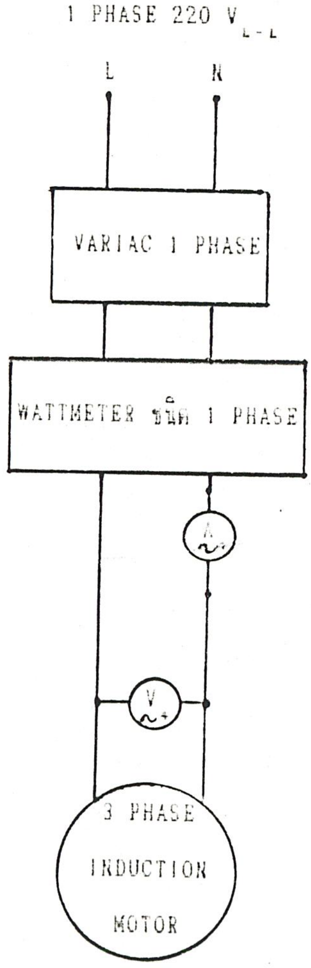


การทดลองที่ 5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและสภาวะการทำงานต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟสที่ต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ คงที่

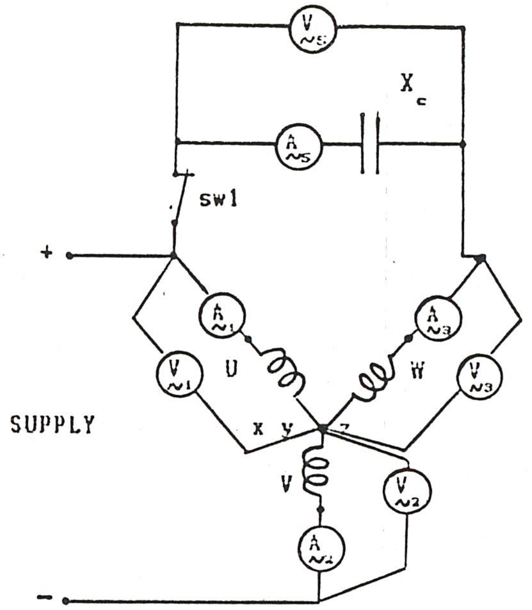
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อรับภาระทางกล โดยได้รับแหล่งจ่ายไฟชนิด 1 เฟส เมื่อประยุกต์การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส โดยทำการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ (capacitor)คงที่
2. สามารถเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างการต่อเฟสบาลานซ์เซอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์และการต่อขดลวด stator แบบต่างๆ ได้

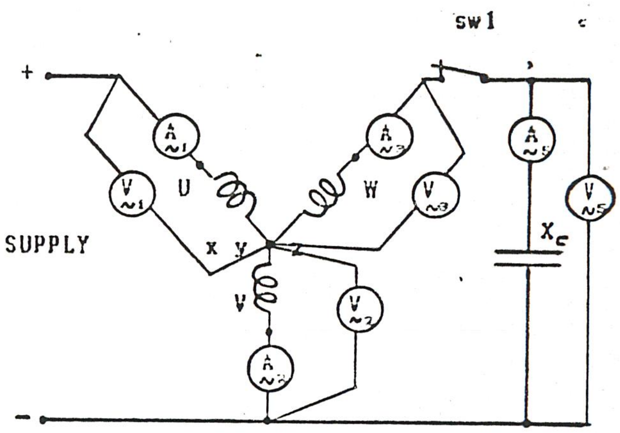
วงจรในการทดลอง



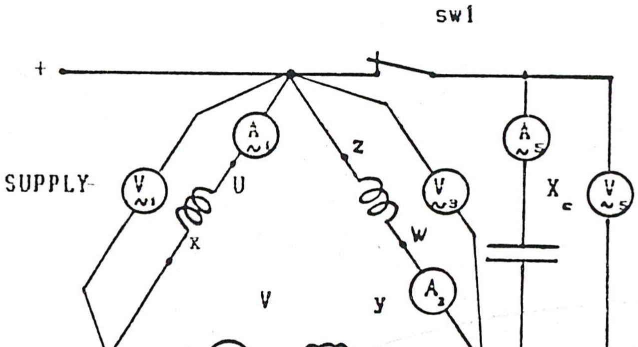
รูปที่ 13



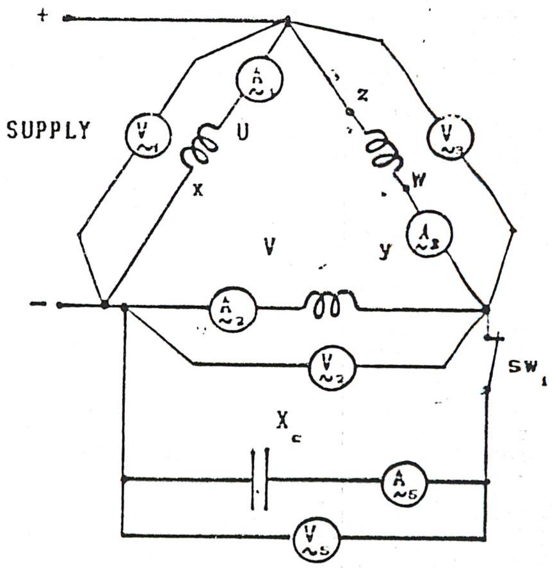
STAR แบบที่ 1



STAR แบบที่ 2



DELTA แบบที่ 1



DELTA แบบที่ 2

รูปที่ 13 (ต่อ) แสดงการต่อขดลวด stator และเฟสบาลานซ์เซอร์ แบบต่าง ๆ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.	มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า	1	ชุด
2.	ชุดตาชั่งแขวนพร้อมชุดโหลด	1	ชุด
3.	ชุดเฟสบาลานซ์เซอร์ (ชุด capacitors)	1	ชุด
4.	AC ampmeter 0-5 A	5	ตัว
5.	AC voltmeter 0-300 V	5	ตัว
6.	multimeter	1	ตัว
7.	variac 1-ϕ	1	ตัว
8.	junction box	3	ชุด
9.	wattmeter 1 เฟส	1	ชุด
10.	wire	70	เส้น
11.	tachometer	1	ตัว

วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรทดลองดังรูป (stator ต่อแบบ star แบบที่ 1) โดยเลือกใช้ขนาดของคาปาซิเตอร์ค่าต่างๆ ทำการต่อโหลดภาระให้แก่มอเตอร์ ซึ่งการต่อคาปาซิเตอร์จะต้องถูกควบคุมให้คงที่ และทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 V.(V_{L-L}) ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส
2. ทำการทดลองแบบ no load ก่อน เพื่อตรวจสอบว่าทิศทางการหมุนของมอเตอร์ว่าถูกทิศทางหรือไม่ (ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ต้องทำให้เกิดแรงยกโหลดภาระ)
3. ในการปรับค่าคาปาซิเตอร์และเพิ่มภาระที่โหลดค่าต่าง ๆ (load) วัดค่า Power Input, กระแส, แรงดันไฟฟ้า, ความเร็วรอบ
4. บันทึกผลในตาราง
5. คำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงบิด ,Power Output และ ประสิทธิภาพ
6. ทำการทดลองดังข้อ 2 ถึงข้อ 5 โดยทำการต่อวงจรโดยขดลวดที่ stator ต่อแบบ star แบบที่ 2 , delta แบบที่ 1 , delta แบบที่ 2 ตามลำดับ

ผลการทดลอง

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 1

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_u (V.)			I_u (A)			ผ่าน C	P_{in} (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_s	I_s	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_c			
15	NO-LOAD	220	0.50	128	139	171	0.82	0.52	1.30	1.92	120	1492.0	0
	มีเชือก												
	0.25	220	0.60	125	140	168	0.72	0.62	1.28	1.4	150	1487.0	0.25
	0.50	220	0.76	122	142	166	0.60	0.78	1.20	1.36	170	1479.0	0.49
	0.75	220	0.82	116	144	162	0.50	0.84	1.18	1.25	200	1473.0	0.74
	1.00	220	0.94	110	139	147	0.44	0.98	1.04	1.15	230	1462.0	0.98
	1.25	220	1.02	108	138	140	0.58	1.10	1.00	1.1	260	1452.0	1.23
	1.50	220	1.20	105	137	134	0.62	1.20	0.98	1.05	290	1441.0	1.46
	1.75	220	1.32	102	136	128	0.80	1.40	0.92	1.00	320	1426.0	1.69
	2.00	220	1.42	100	136	124	0.96	1.50	0.84	0.96	350	1413.0	1.90
	2.25	220	1.64	98	134	115	1.20	1.76	0.80	0.9	400	1386.0	2.15
	2.50	220	1.84	96	134	109	1.40	1.96	0.78	0.85	450	1364.0	2.34
	2.75	220	2.12	93	132	102	1.66	2.20	0.70	0.78	500	1325.0	2.57
20	NO-LOAD	220	0.82	127	152	189	1.04	0.82	1.84	1.96	180	1491.6	0
	มีเชือก												
	0.25	220	0.90	125	152	187	0.92	0.96	1.80	1.82	200	1486.6	0.25
	0.50	220	1.00	123	153	184	0.80	1.02	1.80	1.9	230	1480.0	0.49
	0.75	220	1.08	120	154	182	0.62	1.10	1.78	1.85	250	1473.0	0.74
	1.00	220	1.18	117	154	178	0.50	1.20	1.70	1.8	280	1467.0	0.99
	1.25	220	1.22	113	155	175	0.38	1.30	1.60	1.72	300	1462.0	1.24

C (µF)	LOAD (kg)	SUPPLY		$V_ฆ$ (V.)			$I_ฆ$ (A)			วงจร C	P_{in} (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_s	I_s	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_5			
	1.50	220	1.38	108	155	169	0.22	1.40	1.50	1.6	330	1453.0	1.48
	1.75	220	1.42	104	153	161	0.22	1.44	1.40	1.5	360	1443.0	1.72
	2.00	220	1.56	102	150	153	0.40	1.58	1.38	1.44	380	1431.0	1.92
	2.25	220	1.62	100	146	144	0.60	1.68	1.24	1.38	410	1414.0	2.15
	2.50	220	1.80	99	144	136	0.80	1.80	1.20	1.3	490	1395.0	2.34
	2.75	220	1.96	97	142	129	1.04	1.98	1.16	1.24	480	1372.0	2.57
	3.00	220	2.18	94	140	119	1.38	2.20	1.04	1.15	530	1342.0	2.80
25	NO-LOAD	220	1.22	121	159	198	1.30	1.30	2.34	2.42	240	1487.6	0
	มีเชือก												
	0.25	220	1.30	119	159	196	1.18	1.38	2.30	2.4	260	1482.5	0.25
	0.50	220	1.40	117	160	193	1.03	1.40	2.28	2.35	290	1479.2	0.49
	0.75	220	1.42	114	160	190	0.90	1.50	2.20	2.3	310	1472.8	0.74
	1.00	220	1.50	112	160	188	0.78	1.56	2.18	2.25	340	1466.4	0.99
	1.25	220	1.58	109	160	184	0.60	1.60	2.08	2.2	360	1458.5	1.23
	1.50	220	1.62	106	160	180	0.44	1.64	2.00	2.12	380	1452.3	1.26
	1.75	220	1.70	102	160	176	0.30	1.78	1.72	2.05	400	1444.7	1.65
	2.00	220	1.78	99	158	171	0.18	1.80	1.80	1.94	430	1434.8	1.88
	2.25	220	1.81	96	157	166	0.16	1.84	1.70	1.8	440	1426.9	2.07
	2.50	220	1.90	93	154	159	0.30	1.96	1.62	1.75	460	1415.3	2.29
	2.75	220	1.98	91	150	148	0.50	2.02	1.58	1.65	490	1396.6	2.53

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ star แบบที่ 2

C (µF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C	$P_{i/p}$ (W)	N_r (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_s	I_s	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_c			
1	NO LOAD	220	0.82	104	122	91	0.82	0.90	0.10	0.1	90	1488.3	0.0
	มีเช็อก												
	0.25	220	0.90	106	120	90	0.90	0.96	0.10	0.1	120	1475.4	0.25
	0.50	220	0.98	108	118	88	1.00	1.00	0.10	0.1	150	1464.2	0.49
	0.75	220	1.10	108	116	86	1.10	1.16	0.10	0.1	190	1450.6	0.74
	1.00	220	1.22	110	114	84	1.20	1.22	0.10	0.1	230	1435.3	0.98
	1.25	220	1.40	110	113	82	1.40	1.42	0.10	0.1	280	1416.4	1.21
	1.50	220	1.60	110	111	80	1.60	1.60	0.10	0.22	330	1393.4	1.45
	1.75	220	1.82	110	109	77	1.86	1.90	0.10	0.12	390	1358.6	1.67
	2.00	220	2.26	109	106	69	2.32	2.34	0.10	0.12	480	1303.2	1.88
3	NO-LOAD	220	0.70	102	134	121	0.52	0.78	0.56	0.2	80	1487.8	0
	มีเช็อก												
	0.25	220	0.78	108	130	120	0.61	0.79	0.49	0.2	120	1477.3	0.25
	0.50	220	0.82	109	127	116	0.56	0.80	0.40	0.22	150	1465.7	0.50
	0.75	220	1.00	110	124	113	0.84	0.88	0.40	0.25	190	1452.7	0.75
	1.00	220	1.16	110	122	110	1.00	0.99	0.40	0.25	230	1439.1	0.98
	1.25	220	1.30	111	120	106	1.18	1.10	0.40	0.22	270	1422.2	1.21
	1.50	220	1.48	111	118	103	1.30	1.20	0.40	0.2	320	1403.2	1.44
	1.75	220	1.72	111	115	98	1.52	1.40	0.38	0.2	370	1376.1	1.67
	2.00	220	2.02	110	113	93	1.78	1.60	0.38	0.18	440	1339.5	1.86
5	NO-LOAD	220	0.50	110	110	85	2.08	1.98	0.38	0.6	80	1490.8	0
	มีเช็อก												

C (µF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C	$P_{t/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $w_2 - w_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	I_5			
	0.25	220	0.61	108	130	120	0.61	0.79	0.49	0.55	120	1480.7	0.25
	0.50	220	0.70	109	127	116	0.56	0.80	0.40	0.43	150	1471.7	0.49
	0.75	220	0.82	110	124	113	0.84	0.88	0.40	0.43	180	1460.4	0.74
	1.00	220	0.99	110	122	110	1.00	0.99	0.40	0.47	210	1448.5	0.98
	1.25	220	1.18	111	120	106	1.18	1.10	0.40	0.45	250	1434.3	1.23
	1.50	220	1.30	111	118	103	1.30	1.20	0.40	0.45	290	1421.7	1.44
	1.75	220	1.50	111	115	98	1.52	1.40	0.38	0.43	340	1398.6	1.65
	2.00	220	1.74	110	113	93	1.78	1.60	0.38	0.4	380	1375.8	1.86
	2.25	220	2.04	110	110	85	2.08	1.98	0.38	0.4	460	1332.2	2.07
10	NO LOAD	220	0.40	127	132	159	0.80	0.40	1.40	1.14	115	1494.2	0
	มีเชือก												
	0.25	220	0.56	124	134	157	0.64	0.58	1.02	1.1	130	1486.4	0.24
	0.50	220	0.62	116	134	145	0.60	0.64	0.90	1.0	150	1478.6	0.49
	0.75	220	0.78	111	133	137	0.60	0.80	0.84	0.95	180	1469.7	0.74
	1.00	220	0.82	109	133	132	0.62	0.90	0.82	0.9	210	1460.0	0.96
	1.25	220	1.00	107	133	127	0.74	1.06	0.80	0.88	250	1448.0	1.19
	1.50	220	1.16	105	132	124	0.80	1.20	0.78	0.84	270	1439.0	1.40
	1.75	220	1.36	102	132	118	0.98	1.38	0.70	0.78	320	1420.0	1.64
	2.00	220	1.48	99	132	112	1.16	1.56	0.64	0.74	350	1405.0	1.82
	2.25	220	1.76	96	131	105	1.40	1.80	0.60	0.68	410	1375.4	2.07
	2.50	220	1.96	94	131	100	1.60	2.00	0.58	0.64	460	1355.0	2.30

- กรณี ขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 1

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_m (V.)			I_m (A)			วงจร C		$P_{t/n}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_s	I_s	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_c	I_c			
30	NO-LOAD มีเช็อก	220	1.60	205	214	238	1.50	0.90	1.65	238	2.4	150	1496.2	0
	0.25	220	1.70	205	215	237	1.42	0.95	1.60	237	2.4	200	1493.1	0.05
	0.50	220	1.70	205	216	235	1.40	1.00	1.60	235	2.4	200	1491.5	0.49
	0.75	220	1.70	205	216	231	1.30	1.00	1.45	231	2.3	250	1487.4	0.74
	1.00	220	1.80	203	214	228	1.25	1.00	1.45	228	2.3	250	1484.5	0.98
	1.25	220	1.90	202	214	224	1.25	1.05	1.40	224	2.2	300	1481.5	1.20
	1.50	220	2.00	202	216	222	1.23	1.10	1.40	222	2.1	330	1480.3	1.44
	1.75	220	2.00	202	214	220	1.30	1.10	1.30	214	2.0	350	1476.6	1.65
	2.00	220	2.10	202	214	218	1.38	1.20	1.30	214	2.0	370	1473.4	1.88
	2.25	220	2.20	202	214	216	1.40	1.20	1.25	214	2.0	400	1470.5	2.09
	2.50	220	2.40	202	213	215	1.40	1.20	1.26	215	2.0	420	1467.4	2.30
	2.75	220	2.45	202	213	212	1.45	1.25	1.20	212	2.0	450	1463.7	2.55
	3.00	220	2.60	202	212	210	1.50	1.30	1.20	210	2.0	500	1460.5	2.79
	3.25	220	2.70	202	212	209	1.60	1.40	1.20	209	1.9	530	1455.3	3.03
	3.50	220	2.80	202	211	205	1.65	1.40	1.20	205	1.9	550	1451.6	3.26
	3.75	220	3.00	201	210	204	1.70	1.40	1.20	204	1.9	600	1446.1	3.49
	4.00	220	3.10	201	209	201	1.80	1.45	1.20	201	1.9	620	1444.1	3.70
	4.25	220	3.12	201	208	201	1.95	1.45	1.20	201	1.9	650	1439.8	3.93
	4.50	220	3.40	201	208	201	2.00	1.50	1.20	201	1.8	700	1436.5	4.12
	4.75	220	3.60	201	208	198	2.10	1.60	1.20	198	1.6	720	1431.1	4.35

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_n (V.)			I_n (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_c	I_c			
35	NO-LOAD มีเชือก	220	1.40	204	221	245	1.40	1.00	1.85	245	2.8	150	1496.9	0
	0.25	220	1.45	204	223	243	1.40	1.00	1.80	243	2.8	200	1490.5	0.25
	0.50	220	1.50	204	224	242	1.30	1.10	1.80	242	2.8	220	1488.7	0.50
	0.75	220	1.60	204	224	240	1.23	1.10	1.80	240	2.8	250	1487.1	0.79
	1.00	220	1.65	204	224	237	1.20	1.20	1.70	237	2.8	270	1483.7	0.99
	1.25	220	1.75	204	225	234	1.20	1.20	1.60	234	2.8	300	1481.1	1.03
	1.50	220	1.80	204	224	231	1.20	1.20	1.60	231	2.7	350	1479.5	1.44
	1.75	220	1.90	204	223	228	1.20	1.20	1.60	228	2.6	350	1477.9	1.67
	2.00	220	2.00	204	223	226	1.20	1.20	1.45	226	2.6	400	1475.6	1.88
	2.25	220	2.10	204	223	224	1.25	1.25	1.45	224	2.5	420	1473.1	2.07
	2.50	220	2.20	204	222	222	1.30	1.30	1.40	222	2.4	450	1469.5	2.31
	2.75	220	2.40	204	221	220	1.30	1.35	1.40	220	2.4	480	1464.2	2.56
	3.00	220	2.45	204	222	219	1.40	1.40	1.30	219	2.4	500	1462.4	2.80
	3.25	220	2.60	204	220	217	1.45	1.45	1.25	217	2.4	550	1457.8	3.04
	3.50	220	2.80	204	220	214	1.50	1.50	1.20	214	2.3	560	1454.4	3.29
	3.75	220	2.90	204	219	212	1.60	1.50	1.20	212	2.25	600	1451.0	3.53
	4.00	220	3.00	204	219	211	1.65	1.60	1.20	211	2.25	630	1447.6	3.74
	4.25	220	3.10	204	218	210	1.70	1.60	1.20	210	2.2	650	1445.5	3.97
	4.50	220	3.30	204	217	207	1.85	1.60	1.20	207	2.2	700	1438.6	4.21
	4.75	220	3.40	205	218	206	1.95	1.70	1.20	206	2.1	730	1436.5	4.43
	5.00	220	3.60	203	214	202	2.05	1.70	1.20	202	2.1	750	1432.6	4.59

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C		$P_{t/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $W_2 - W_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
40	NO-LOAD	220	1.30	206	232	252	1.40	1.20	2.10	252	3.2	200	1496.5	0
	มีเชือก													
	0.25	220	1.40	205	232	250	1.40	1.25	2.05	250	3.2	230	1490.2	0.25
	0.50	220	1.40	205	233	249	1.30	1.30	2.05	249	3.2	250	1488.7	0.49
	0.75	220	1.50	205	233	247	1.25	1.25	2.00	247	3.2	270	1486.3	0.75
	1.00	220	1.60	205	234	246	1.20	1.40	1.95	246	3.2	300	1484.1	0.98
	1.25	220	1.60	205	234	244	1.20	1.40	1.90	244	3.2	350	1481.2	1.21
	1.50	220	1.75	205	235	242	1.20	1.45	1.80	242	3.2	350	1480.7	1.42
	1.75	220	1.80	206	235	238	1.20	1.45	1.70	238	3.2	400	1478.3	1.65
	2.00	220	2.00	206	234	236	1.20	1.60	1.60	236	3.1	400	1476.1	1.89
	2.25	220	2.00	206	234	233	1.20	1.60	1.60	233	3.0	450	1472.4	2.13
	2.50	220	2.20	206	232	230	1.20	1.60	1.60	230	3.0	470	1471.4	2.37
	2.75	220	2.25	205	231	228	1.20	1.60	1.50	228	2.9	480	1468.1	2.57
	3.00	220	2.40	205	230	226	1.30	1.60	1.50	226	2.9	500	1462.2	2.81
	3.25	220	2.50	203	227	221	1.30	1.60	1.40	221	2.8	530	1461.1	3.05
	3.50	220	2.70	203	226	220	1.40	1.65	1.40	220	2.8	550	1456.5	3.30
	3.75	220	2.80	204	226	218	1.40	1.65	1.30	218	2.8	600	1452.4	3.54
	4.00	220	2.90	204	226	216	1.50	1.70	1.30	216	2.75	620	1450.4	3.74
	4.25	220	3.00	204	225	216	1.60	1.70	1.25	216	2.7	650	1449.6	3.93
	4.50	220	3.10	204	224	213	1.65	1.80	1.25	213	2.7	700	1444.1	4.12
	4.75	220	3.25	204	224	212	1.70	1.80	1.20	212	2.6	730	1438.0	4.35
	5.00	220	3.40	206	224	211	1.90	1.80	1.20	211	2.6	750	1436.5	4.58
	5.25	220	3.60	204	221	204	1.95	1.90	1.20	204	2.45	770	1431.2	4.77

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_m (V.)			I_m (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $W_2 - W_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
	5.50	220	3.95	202	218	200	2.00	1.95	1.20	200	2.40	850	1426.5	4.98
45	NO-LOAD	220	1.20	206	240	256	1.40	1.40	2.40	256	3.6	200	1496.6	0
	มีเชือก													
	0.25	220	1.30	206	241	256	1.30	1.40	2.30	256	3.65	250	1494.3	0.25
	0.50	220	1.40	206	241	255	1.30	1.45	2.30	255	3.75	250	1492.6	0.50
	0.75	220	1.40	206	241	253	1.20	1.45	2.25	253	3.75	300	1489.9	0.74
	1.00	220	1.50	206	242	251	1.20	1.60	2.20	251	3.8	350	1487.6	0.99
	1.25	220	1.60	205	242	249	1.15	1.60	2.15	249	3.8	350	1484.5	1.24
	1.50	220	1.70	205	242	248	1.10	1.60	2.10	248	3.6	400	1482.4	1.48
	1.75	220	1.85	205	242	245	1.10	1.72	2.00	245	3.6	400	1480.2	1.68
	2.00	220	2.00	205	242	242	1.10	1.70	1.90	242	3.6	400	1475.9	1.90
	2.25	220	2.20	204	241	238	1.10	1.80	1.80	238	3.5	450	1474.3	2.14
	2.50	220	2.20	207	243	240	1.10	1.80	1.80	240	3.5	500	1472.3	2.36
	2.75	220	2.30	206	242	237	1.10	1.80	1.70	237	3.4	500	1471.7	2.60
	3.00	220	2.40	206	244	234	1.20	1.80	1.70	234	3.4	530	1469.6	2.81
	3.25	220	2.50	206	239	232	1.20	1.85	1.60	232	3.4	550	1465.6	3.04
	3.50	220	2.65	206	238	230	1.20	1.85	1.60	230	3.35	600	1462.2	3.26
	3.75	220	2.75	205	236	227	1.25	1.90	1.15	227	3.20	620	1458.3	3.45
	4.00	220	2.90	205	234	224	1.40	1.90	1.45	224	3.20	650	1453.1	3.69
	4.25	220	3.05	204	232	220	1.45	1.90	1.40	220	3.2	670	1448.3	3.93
	4.50	220	3.10	204	231	218	1.50	1.95	1.40	218	3.15	700	1444.3	4.16
	4.75	220	3.25	204	229	216	1.60	1.95	1.30	216	3.0	700	1439.4	4.37
	5.00	220	3.40	204	228	213	1.70	2.00	1.25	213	3.0	750	1436.3	4.61

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C		$P_{t/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
	5.25	220	3.60	204	227	211	1.80	2.00	1.25	211	3.0	760	1432.3	4.84
	5.50	220	3.80	204	226	208	1.95	2.05	1.20	208	3.0	850	1427.5	5.08
50	NO-LOAD	220	1.22	206	249	261	1.30	1.60	2.60	261	4.2	260	1496.2	0
	มีเชือก													
	0.25	220	1.32	207	249	261	1.28	1.64	2.58	261	4.2	289	1494.7	0.25
	0.50	220	1.42	207	250	261	1.20	1.70	2.56	261	4.18	310	1491.8	0.50
	0.75	220	1.52	206	250	258	1.18	1.74	2.44	258	4.18	330	1489.1	0.74
	1.00	220	1.62	206	251	257	1.18	1.78	2.42	257	4.17	360	1486.6	0.98
	1.25	220	1.78	207	251	256	1.16	1.80	2.40	256	4.16	390	1483.7	1.21
	1.50	220	1.90	207	252	254	1.18	1.82	2.40	254	4.16	418	1481.0	1.45
	1.75	220	2.00	209	254	254	1.18	1.90	2.36	254	4.16	445	1480.4	1.70
	2.00	220	2.18	210	254	253	1.18	1.96	2.28	253	4.1	470	1477.1	1.92
	2.25	220	2.24	208	252	250	1.10	1.98	2.18	250	4.0	490	1474.3	2.13
	2.50	220	2.38	208	252	247	1.08	2.00	2.08	247	3.98	510	1471.5	2.34
	2.75	220	2.50	209	250	241	1.08	2.02	2.02	241	3.96	545	1468.6	2.58
	3.00	220	2.60	205	249	239	1.08	2.02	1.84	239	3.8	560	1463.6	2.80
	3.25	220	2.76	205	249	237	1.04	2.04	1.80	237	3.8	588	1461.5	3.05
	3.50	220	2.82	206	248	235	1.10	2.08	1.78	235	3.75	615	1459.3	3.29
	3.75	220	2.98	206	246	233	1.18	2.12	1.68	233	3.65	640	1455.6	3.47
	4.00	220	3.00	206	246	231	1.20	2.12	1.62	231	3.6	660	1453.5	3.72
	4.25	220	3.20	205	245	230	1.22	2.14	1.60	230	3.6	680	1449.2	3.89
	4.50	220	3.18	206	244	227	1.30	2.18	1.58	227	3.6	720	1444.5	4.08

- กรณีขดลวด stator ต่อแบบ delta แบบที่ 2

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $W_2 - W_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
1	NO LOAD	220	2.98	205	195	177	1.92	1.08	1.05	177	0.78	170	1495.0	0
	มีเชือก													
	0.25	220	2.99	205	194	178	1.96	1.08	1.01	178	0.78	210	1491.0	0.25
	0.50	220	3.00	205	192	178	1.96	1.08	1.01	178	0.78	240	1488.0	0.50
	0.75	220	3.00	203	188	177	1.97	1.08	1.01	177	0.78	265	1483.0	0.75
	1.00	220	3.20	204	187	178	1.98	1.09	1.01	178	0.78	295	1479.0	0.99
	1.25	220	3.40	204	185	178	2.00	1.10	1.20	178	0.80	330	1476.5	1.20
	1.50	220	3.16	204	184	178	2.40	1.12	1.40	178	0.80	360	1471.0	1.42
5	NO-LOAD	220	2.20	203	208	188	1.70	1.18	0.78	188	0.98	100	1494.3	0
	มีเชือก													
	0.25	220	2.22	206	210	191	1.64	1.18	0.80	191	0.98	180	1490.6	0.25
	0.50	220	2.24	206	208	192	1.64	1.18	0.80	192	0.98	210	1487.8	0.50
	0.75	220	2.28	205	206	191	1.62	1.16	0.82	191	0.98	240	1484.8	0.75
	1.00	220	2.34	205	204	192	1.64	1.16	0.82	192	0.98	270	1481.3	0.99
	1.25	220	2.40	205	202	192	1.64	1.10	0.84	192	0.98	300	1478.2	1.24
	1.50	220	2.42	204	200	192	1.68	1.12	0.90	192	0.98	330	1475.2	1.48
	1.75	220	2.54	204	198	193	1.72	1.12	0.92	193	0.98	360	1471.2	1.72
	2.00	220	2.60	204	197	194	1.78	1.16	0.96	194	0.98	390	1466.7	1.94
	2.25	220	2.70	204	196	194	1.80	1.16	0.98	194	0.98	420	1463.5	2.16
	2.50	220	2.80	204	194	194	1.86	1.18	1.00	194	0.98	450	1461.2	2.34
	2.75	220	2.90	204	193	194	1.92	1.18	1.20	194	0.98	485	1455.8	2.57
	3.00	220	3.00	204	192	194	2.00	1.20	1.08	194	0.98	520	1453.3	2.81

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_m (V.)			I_m (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	ΔW = $w_4 - w_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
	3.25	220	3.16	204	190	194	2.06	1.20	1.10	194	0.96	550	1448.2	3.05
10	NO-LOAD	220	2.22	206	213	192	1.70	1.18	0.80	192	0.98	100	1495.0	0
	มีเชือก													
	0.25	220	2.22	206	211	192	1.64	1.18	0.90	192	0.98	180	1492.2	0.25
	0.50	220	2.26	206	209	192	1.64	1.18	0.90	192	0.98	210	1489.0	0.50
	0.75	220	2.30	207	207	193	1.64	1.18	0.82	193	0.98	240	1487.3	0.74
	1.00	220	2.38	206	205	193	1.64	1.08	0.84	193	0.98	270	1483.5	0.99
	1.25	220	2.40	206	204	193	1.64	1.16	0.90	193	0.98	300	1479.0	1.24
	1.50	220	2.44	206	202	194	1.70	1.16	0.92	194	0.98	330	1476.0	1.49
	1.75	220	2.56	206	200	194	1.76	1.18	0.98	194	0.98	365	1472.0	1.72
	2.00	220	2.62	206	199	194	1.80	1.18	0.98	194	0.98	395	1467.5	1.92
	2.25	220	2.74	206	197	195	1.82	1.18	1.00	195	0.98	428	1465.0	2.17
	2.50	220	2.82	206	196	196	1.90	1.18	1.02	196	0.98	460	1461.0	2.40
	2.75	220	2.98	206	195	196	1.96	1.20	1.04	196	0.96	490	1457.0	2.63
	3.00	220	3.40	206	194	196	2.02	1.20	1.10	196	0.98	535	1453.0	2.82
15	NO-LOAD	220	2.20	206	212	191	1.66	1.18	0.78	191	1.08	150	1494.7	0
	มีเชือก													
	0.25	220	2.22	205	210	191	1.63	1.18	0.80	191	1.08	180	1491.2	0.25
	0.50	220	2.22	205	208	191	1.62	1.18	0.80	191	1.05	205	1488.2	0.49
	0.75	220	2.28	205	206	191	1.61	1.16	0.80	191	1.05	235	1484.9	0.74
	1.00	220	2.30	205	204	192	1.61	1.10	0.82	192	1.05	260	1483.9	0.97
	1.25	220	2.38	204	202	191	1.62	1.12	0.82	191	1.04	288	1480.0	1.19
	1.50	220	2.42	204	200	192	1.64	1.12	0.86	192	1.04	318	1475.5	1.40

C (μF)	LOAD (kg)	SUPPLY		V_p (V.)			I_p (A)			วงจร C		$P_{i/p}$ (W)	N_R (RPM)	$\Delta W = W_2 - W_1$ (kg)
		V_4	I_4	V_1	V_2	V_3	I_1	I_2	I_3	V_5	I_5			
	1.75	220	2.50	204	198	192	1.70	1.12	0.90	192	1.04	348	1472.3	1.63
	2.00	220	2.58	204	197	193	1.78	1.14	0.96	193	1.02	380	1470.3	1.86
	2.25	220	2.64	204	195	193	1.80	1.16	0.98	193	1.02	412	1466.2	2.07
	2.50	220	2.76	204	194	193	1.82	1.16	1.00	193	1.01	438	1461.7	2.31
	2.75	220	2.82	203	192	193	1.90	1.18	1.02	193	1.01	470	1457.8	2.55
	3.00	220	2.96	203	191	193	1.96	1.18	1.04	193	1.01	495	1454.5	2.76
	3.25	220	3.10	203	189	193	2.20	1.20	1.10	193	1.0	545	1449.4	3.01

FIX C (WITH 1 PHASE SUPPLY)

DELTA CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 30 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.003	150	0.000	0.000	0.00
0.25	0.005	200	0.037	5.754	2.88
0.50	0.006	200	0.361	56.332	28.17
0.75	0.008	250	0.544	84.839	33.94
1.00	0.010	250	0.721	112.135	44.85
1.25	0.012	300	0.883	137.030	45.68
1.50	0.013	330	1.059	164.303	49.79
1.75	0.016	350	1.214	187.793	53.66
2.00	0.018	370	1.383	213.507	57.70
2.25	0.020	400	1.538	236.889	59.22
2.50	0.022	420	1.692	260.142	61.94
2.75	0.024	450	1.876	287.691	63.93
3.00	0.026	500	2.053	314.079	62.82
3.25	0.030	530	2.229	339.883	64.13
3.50	0.032	550	2.399	364.752	66.32
3.75	0.036	600	2.568	389.061	64.84
4.00	0.037	620	2.722	411.844	66.43
4.25	0.040	650	2.891	436.142	67.10
4.50	0.042	700	3.031	456.180	65.17
4.75	0.046	720	3.201	479.836	66.64

DELTA CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 35 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.002	150	0.000	0.000	0.00
0.25	0.006	200	0.184	28.721	14.36
0.50	0.008	220	0.368	57.373	26.08
0.75	0.009	250	0.544	84.821	33.93
1.00	0.011	270	0.728	113.218	41.93
1.25	0.013	300	0.758	117.586	39.20
1.50	0.014	350	1.059	164.214	46.92
1.75	0.015	350	1.229	190.237	54.35
2.00	0.016	400	1.383	213.826	53.46
2.25	0.018	420	1.523	235.037	55.96
2.50	0.020	450	1.700	261.647	58.14
2.75	0.024	480	1.884	288.918	60.19
3.00	0.025	500	2.060	315.615	63.12
3.25	0.028	550	2.237	341.590	62.11
3.50	0.030	560	2.421	368.819	65.86
3.75	0.033	600	2.597	394.799	65.80

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
4.00	0.035	630	2.752	417.305	66.24
4.25	0.036	650	2.921	442.326	68.05
4.50	0.041	700	3.098	466.827	66.69
4.75	0.042	730	3.259	490.505	67.19
5.00	0.045	750	3.377	506.840	67.58

DELTA CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 40uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.002	200	0.000	0.000	0.00
0.25	0.007	230	0.184	28.716	12.49
0.50	0.008	250	0.361	56.226	22.49
0.75	0.009	270	0.552	85.921	31.82
1.00	0.011	300	0.721	112.104	37.37
1.25	0.013	350	0.890	138.144	39.47
1.50	0.013	350	1.045	162.065	46.30
1.75	0.014	400	1.214	188.010	47.00
2.00	0.016	400	1.391	215.036	53.76
2.25	0.018	450	1.567	241.735	53.72
2.50	0.019	470	1.744	268.790	57.19
2.75	0.021	480	1.891	290.819	60.59
3.00	0.025	500	2.067	316.699	63.34
3.25	0.026	530	2.244	343.489	64.81
3.50	0.023	550	2.428	372.764	67.78
3.75	0.032	600	2.605	396.299	66.05
4.00	0.033	620	2.752	418.112	67.44
4.25	0.034	650	2.891	439.111	67.56
4.50	0.037	700	3.031	458.594	65.51
4.75	0.041	730	3.201	482.150	66.05
5.00	0.042	750	3.370	507.113	67.62
5.25	0.046	770	3.510	526.202	68.34
5.50	0.049	850	3.664	547.487	64.41

DELTA CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 45uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.002	200	0.000	0.000	0.00
0.25	0.004	250	0.184	28.795	11.52
0.50	0.005	250	0.368	57.524	23.01
0.75	0.007	300	0.544	84.981	28.33
1.00	0.008	350	0.728	113.515	32.43

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
1.25	0.010	350	0.912	141.885	40.54
1.50	0.012	400	1.089	169.107	42.28
1.75	0.013	400	1.236	191.674	47.92
2.00	0.016	400	1.398	216.145	54.04
2.25	0.017	450	1.575	243.183	54.04
2.50	0.018	500	1.736	267.819	53.56
2.75	0.019	500	1.913	294.935	58.99
3.00	0.020	530	2.067	318.302	60.06
3.25	0.023	550	2.237	343.418	62.44
3.50	0.025	600	2.399	367.416	61.24
3.75	0.028	620	2.538	387.793	62.55
4.00	0.031	650	2.715	413.291	63.58
4.25	0.034	670	2.891	438.717	65.48
4.50	0.037	700	3.061	463.110	66.16
4.75	0.040	700	3.215	484.838	69.26
5.00	0.042	750	3.392	510.364	68.05
5.25	0.045	760	3.561	534.334	70.31
5.50	0.048	850	3.716	555.650	65.37

DELTA CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 50uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.003	260	0.000	0.000	0.00
0.25	0.004	289	0.184	28.802	9.97
0.50	0.005	310	0.368	57.493	18.55
0.75	0.007	330	0.544	84.935	25.74
1.00	0.009	360	0.721	112.293	31.19
1.25	0.011	390	0.890	138.377	35.48
1.50	0.013	418	1.067	165.522	39.60
1.75	0.013	445	1.251	193.982	43.59
2.00	0.015	470	1.413	218.597	46.51
2.25	0.017	490	1.567	242.047	49.40
2.50	0.019	510	1.722	265.405	52.04
2.75	0.021	545	1.898	292.050	53.59
3.00	0.024	560	2.075	318.130	56.81
3.25	0.026	588	2.244	343.584	58.43
3.50	0.027	615	2.347	358.814	58.34
3.75	0.030	640	2.597	396.050	61.88
4.00	0.031	660	2.737	416.765	63.15
4.25	0.034	688	2.715	412.181	59.91
4.50	0.037	720	3.002	454.267	63.09

DELTA CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 1 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.003	170	0.000	0.000	0.00
0.25	0.006	210	0.184	28.731	13.68
0.50	0.008	240	0.368	57.346	23.89
0.75	0.011	265	0.552	85.731	32.35
1.00	0.014	295	0.728	112.859	38.26
1.25	0.016	330	0.883	136.568	41.38
1.50	0.019	360	1.045	161.003	44.72

DELTA CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 5 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.004	100	0.000	0.000	0.00
0.25	0.006	180	0.184	28.723	15.96
0.50	0.008	210	0.368	57.339	27.30
0.75	0.010	240	0.552	85.835	35.76
1.00	0.012	270	0.728	113.035	41.86
1.25	0.015	300	0.912	141.283	47.09
1.50	0.017	330	1.089	168.285	51.00
1.75	0.019	360	1.265	195.045	54.18
2.00	0.022	390	1.427	219.319	56.24
2.25	0.024	420	1.589	243.658	58.01
2.50	0.026	450	1.722	263.548	58.57
2.75	0.029	485	1.891	288.382	59.46
3.00	0.031	520	2.067	314.771	60.53
3.25	0.035	550	2.244	340.457	61.90

DELTA CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 10 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.003	100	0.000	0.000	0.00
0.25	0.005	180	0.184	28.754	15.97
0.50	0.007	210	0.368	57.385	27.33
0.75	0.008	240	0.544	84.833	35.35
1.00	0.011	270	0.728	113.203	41.93
1.25	0.014	300	0.912	141.359	47.12
1.50	0.016	330	1.096	169.514	51.37
1.75	0.019	365	1.265	195.151	53.47
2.00	0.022	395	1.413	217.177	54.98
2.25	0.023	428	1.597	245.037	57.25

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
2.50	0.026	460	1.766	270.268	58.75
2.75	0.029	490	1.935	295.358	60.28
3.00	0.031	535	2.075	315.826	59.03

DELTA CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 15 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.004	150	0.000	0.000	0.00
0.25	0.006	180	0.184	28.735	15.96
0.50	0.008	205	0.361	56.207	27.42
0.75	0.010	235	0.544	84.696	36.04
1.00	0.011	260	0.714	110.946	42.67
1.25	0.013	288	0.876	135.751	47.14
1.50	0.016	318	1.030	159.221	50.07
1.75	0.018	348	1.199	184.977	53.15
2.00	0.020	380	1.368	210.791	55.47
2.25	0.023	412	1.523	233.936	56.78
2.50	0.026	438	1.700	260.258	59.42
2.75	0.028	470	1.876	286.531	60.96
3.00	0.030	495	2.031	309.426	62.51
3.25	0.034	545	2.215	336.270	61.70

STAR CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 10 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.004	115	0.000	0.000	0.00
0.25	0.009	130	0.177	27.497	21.15
0.50	0.014	150	0.361	55.845	37.23
0.75	0.020	180	0.544	83.829	46.57
1.00	0.027	210	0.706	108.033	51.44
1.25	0.035	250	0.876	132.816	53.13
1.50	0.041	270	1.030	155.282	57.51
1.75	0.053	320	1.207	179.501	56.09
2.00	0.063	350	1.339	197.098	56.31
2.25	0.083	410	1.523	219.385	53.51
2.50	0.097	460	1.692	240.215	52.22

STAR CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 15 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.005	120	0.000	0.000	0.00
0.25	0.009	150	0.184	28.654	19.10
0.50	0.014	170	0.361	55.860	32.86
0.75	0.018	200	0.544	84.017	42.01
1.00	0.025	230	0.721	110.435	48.02
1.25	0.032	260	0.905	137.659	52.95
1.50	0.039	290	1.074	162.163	55.92
1.75	0.049	320	1.243	185.755	58.05
2.00	0.058	350	1.398	206.933	59.12
2.25	0.076	400	1.582	229.686	57.42
2.50	0.091	450	1.722	246.016	54.67
2.75	0.117	500	1.891	262.472	52.49

STAR CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 20 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.006	180	0.000	0.000	0.00
0.25	0.009	200	0.184	28.646	14.32
0.50	0.013	230	0.361	55.897	24.30
0.75	0.018	250	0.544	84.017	33.61
1.00	0.022	280	0.728	111.944	39.98
1.25	0.025	300	0.912	139.734	46.58
1.50	0.031	330	1.089	165.753	50.23

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
1.75	0.038	360	1.265	191.306	53.14
2.00	0.046	380	1.413	211.775	55.73
2.25	0.057	410	1.582	234.327	57.15
2.50	0.070	440	1.722	251.608	57.18
2.75	0.085	480	1.891	271.782	56.62
3.00	0.105	530	2.060	289.630	54.65

STAR CASE 1 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 25 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.008	240	0.000	0.000	0.00
0.25	0.012	260	0.184	28.567	10.99
0.50	0.014	290	0.361	55.867	19.26
0.75	0.018	310	0.544	84.006	27.10
1.00	0.022	340	0.728	111.898	32.91
1.25	0.028	360	0.905	138.275	38.41
1.50	0.032	380	0.927	141.046	37.12
1.75	0.037	400	1.214	183.736	45.93
2.00	0.043	430	1.383	207.914	48.35
2.25	0.049	440	1.523	227.666	51.74
2.50	0.056	460	1.685	249.815	54.31
2.75	0.069	490	1.861	272.349	55.58

STAR CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 1 uF

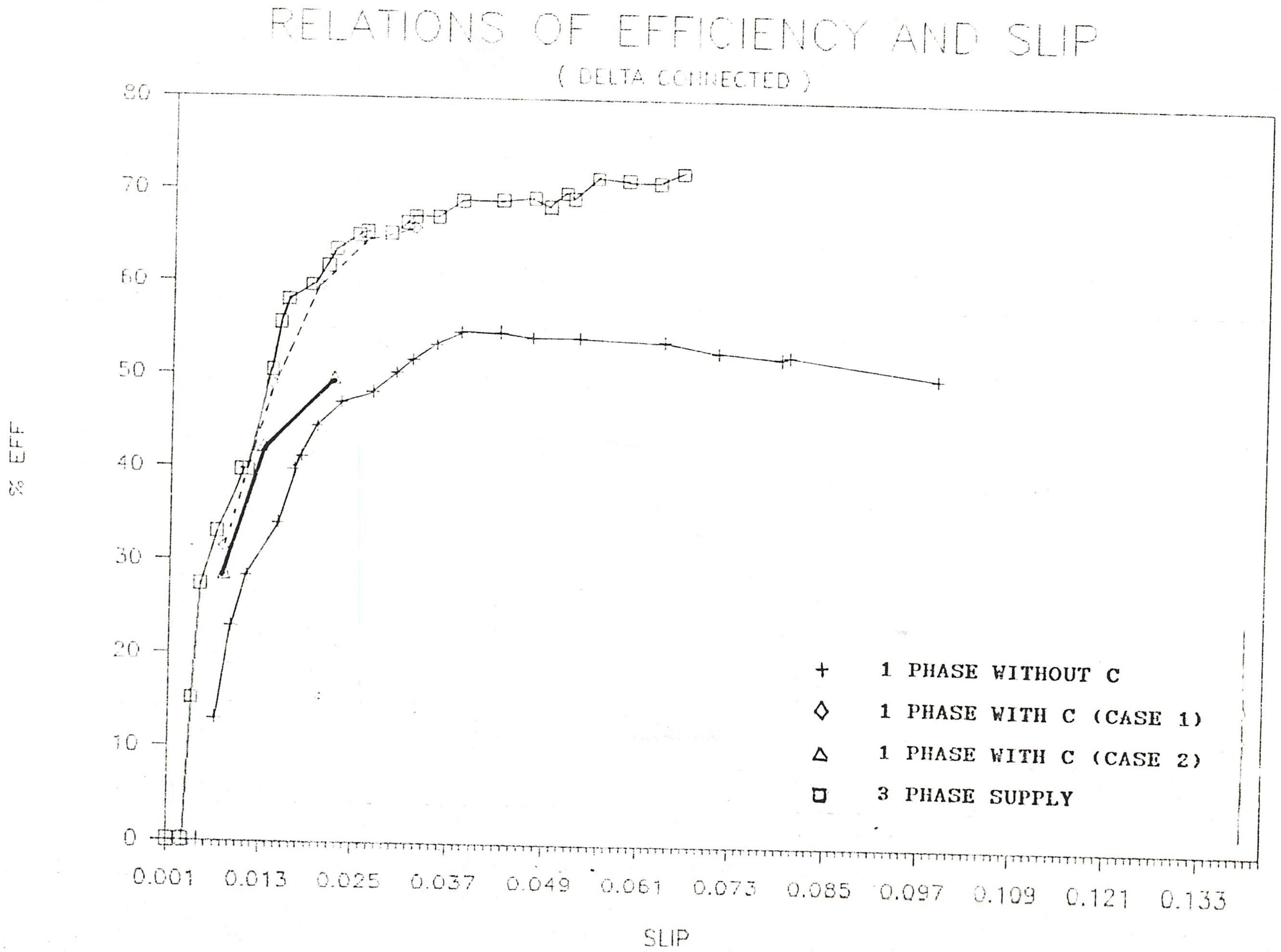
LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.008	90	0.000	0.000	0.00
0.25	0.016	120	0.184	28.430	23.69
0.50	0.024	150	0.361	55.301	36.87
0.75	0.033	190	0.544	82.740	43.55
1.00	0.043	230	0.721	108.418	47.14
1.25	0.056	280	0.890	132.101	47.18
1.50	0.071	330	1.067	155.732	47.19
1.75	0.094	390	1.229	174.881	44.84
2.00	0.131	480	1.383	188.844	39.34

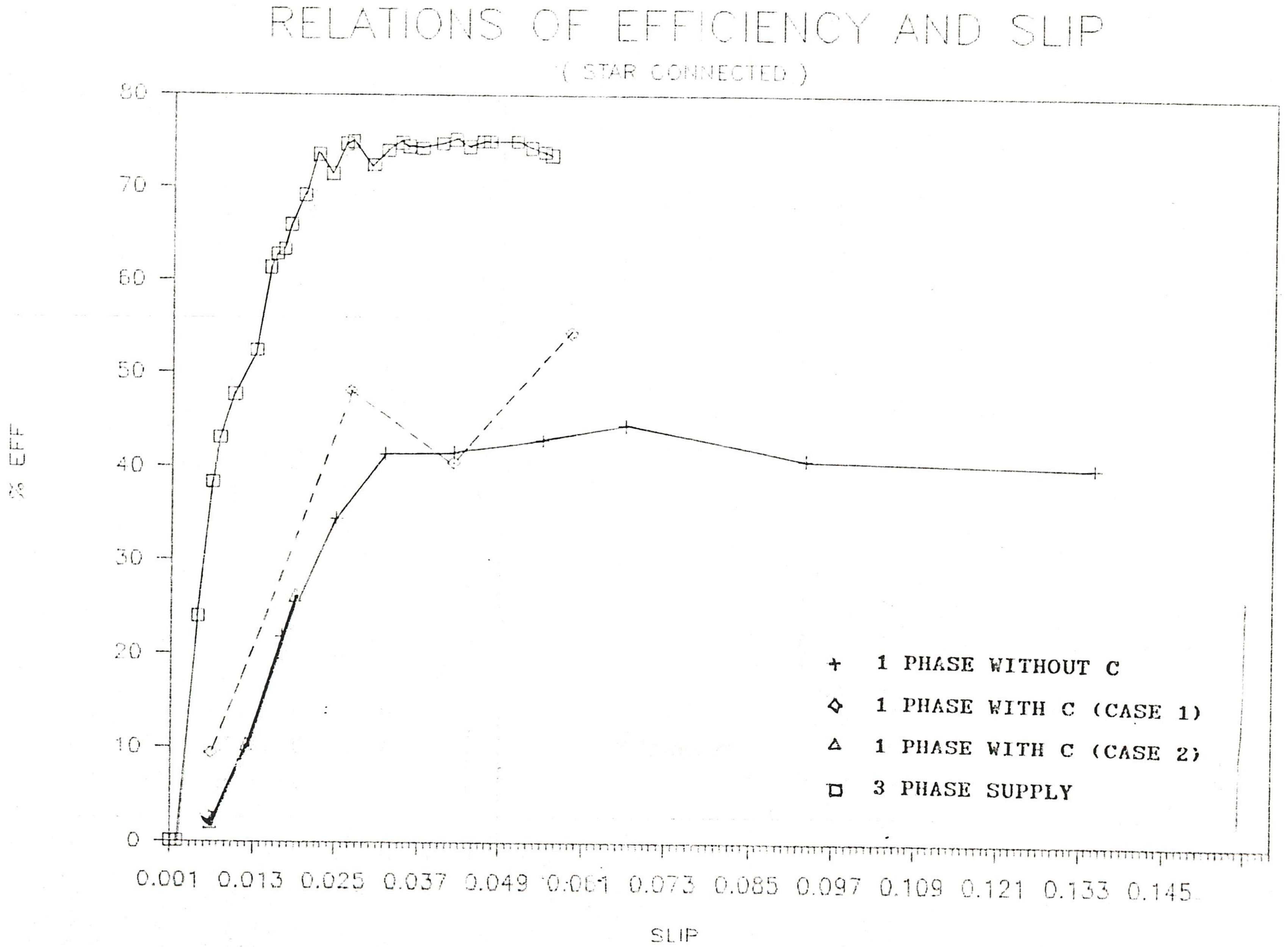
STAR CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 3 uF

LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.008	80	0.000	0.000	0.00
0.25	0.015	120	0.184	28.467	23.72
0.50	0.023	150	0.361	55.357	36.90
0.75	0.032	190	0.544	82.859	43.61
1.00	0.041	230	0.721	108.705	47.26
1.25	0.052	270	0.905	134.834	49.94
1.50	0.065	320	1.059	155.746	48.67
1.75	0.083	370	1.214	175.012	47.30
2.00	0.107	440	1.368	192.039	43.65

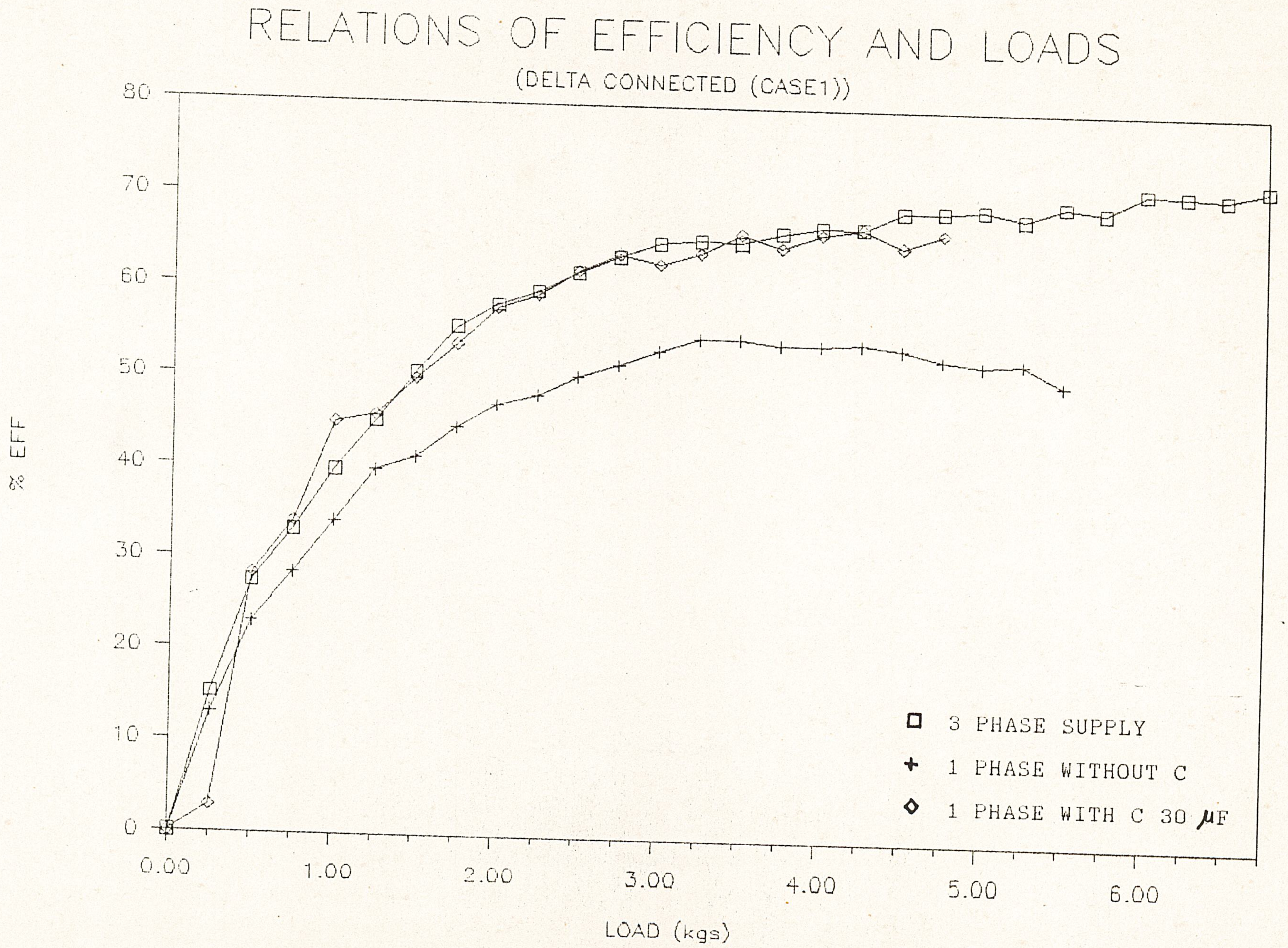
STAR CASE 2 (1 PHASE SUPPLY)
FIX C= 5 uF

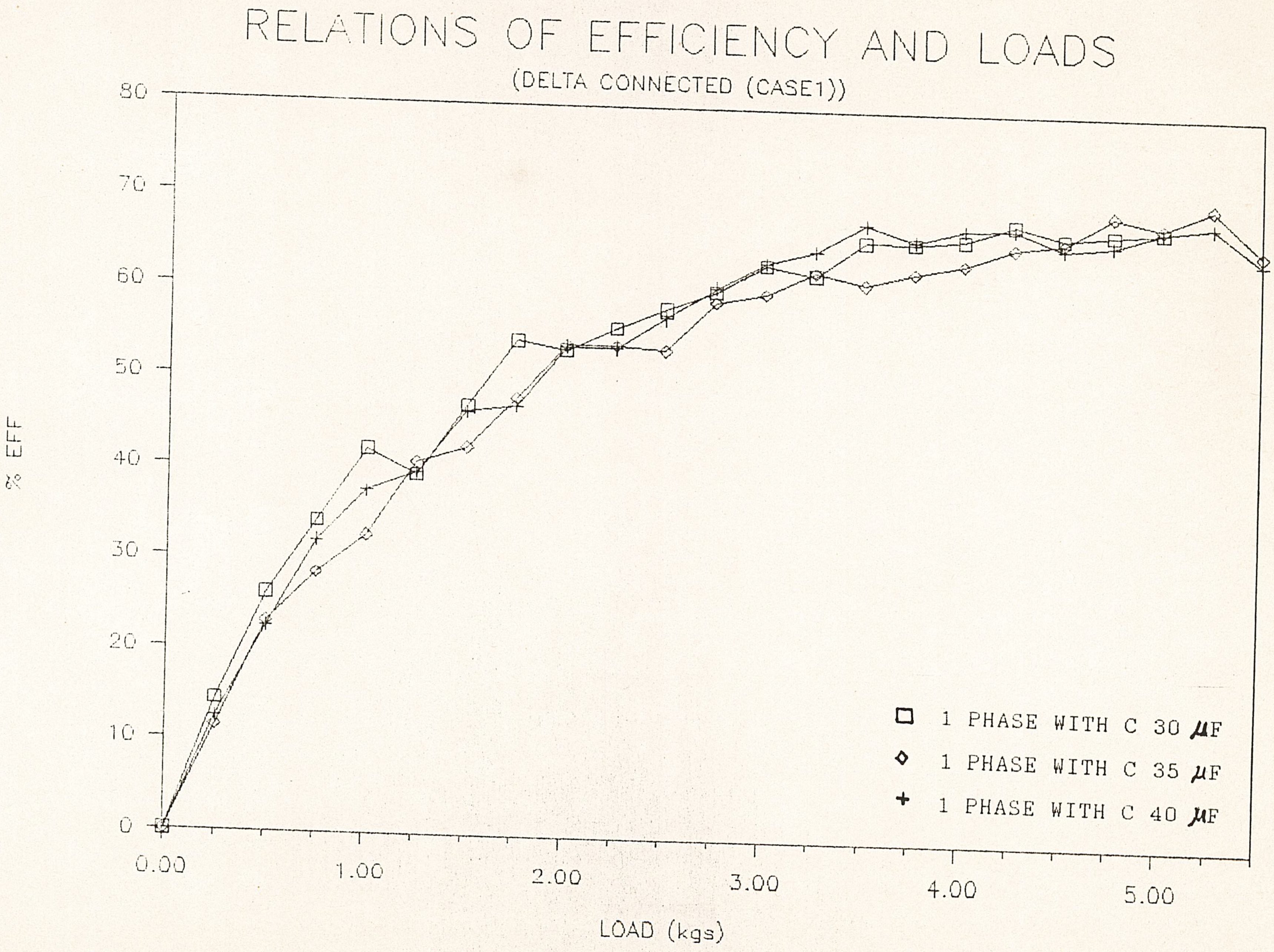
LOAD (kg)	SLIP	Pi/p(W)	To/p(N-M)	Po/p(W)	% EFF
NO-LOAD2	0.006	80	0.000	0.000	0.00
0.25	0.013	120	0.184	28.533	23.78
0.50	0.019	150	0.361	55.584	37.06
0.75	0.026	180	0.544	83.299	46.28
1.00	0.034	210	0.721	109.415	52.10
1.25	0.044	250	0.905	135.981	54.39
1.50	0.052	290	1.059	157.799	54.41
1.75	0.068	340	1.214	177.873	52.32
2.00	0.083	380	1.368	197.243	51.91
2.25	0.112	460	1.523	212.556	46.21

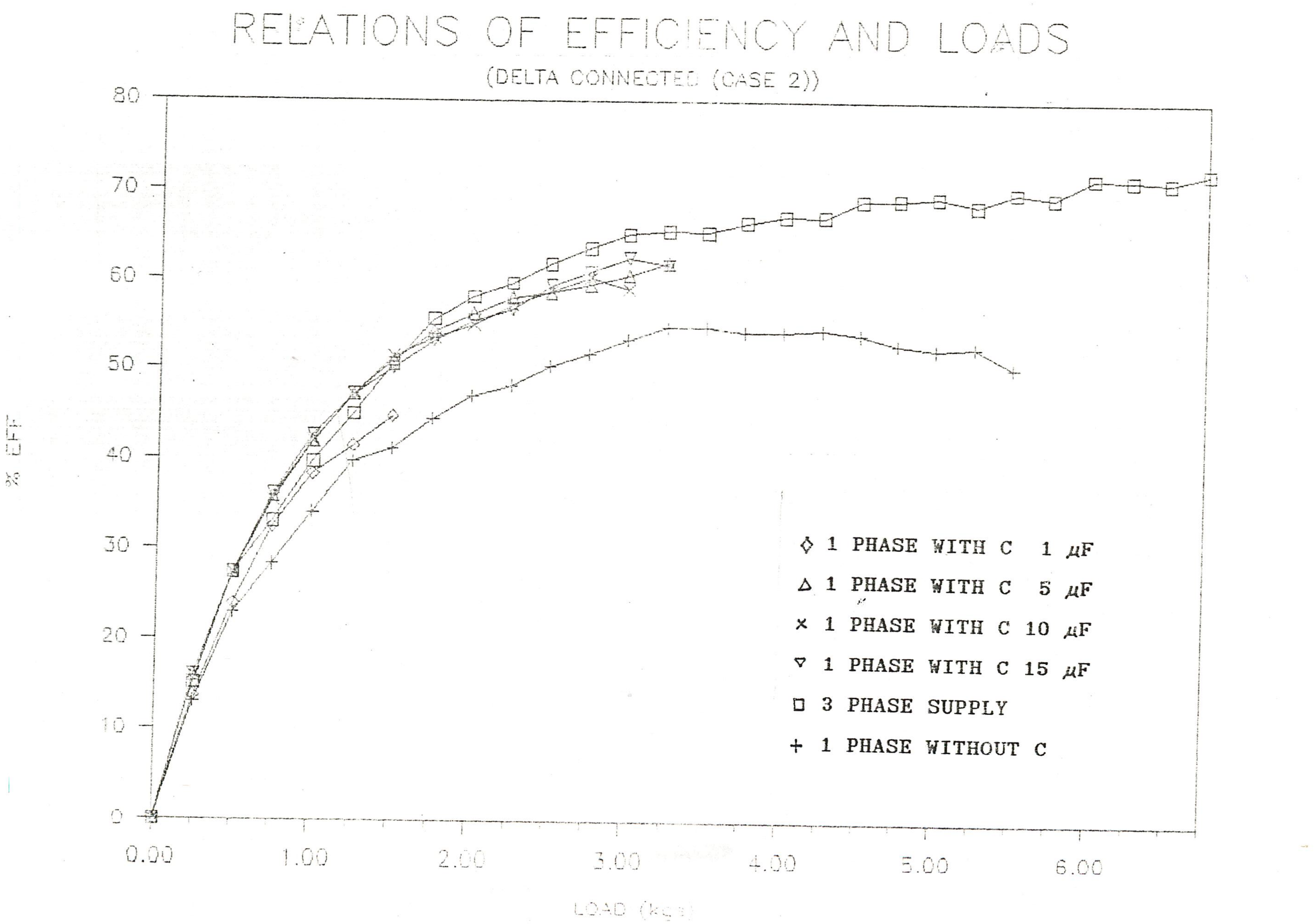

RELATIONS OF EFFICIENCY AND SLIP
(DELTA CONNECTED)
% EFF
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.001
0.013
0.025
0.037
0.049
0.061
0.073
0.085
0.097
0.109
0.121
0.133
SLIP
+ 1 PHASE WITHOUT C
◇ 1 PHASE WITH C (CASE 1)
△ 1 PHASE WITH C (CASE 2)
□ 3 PHASE SUPPLY

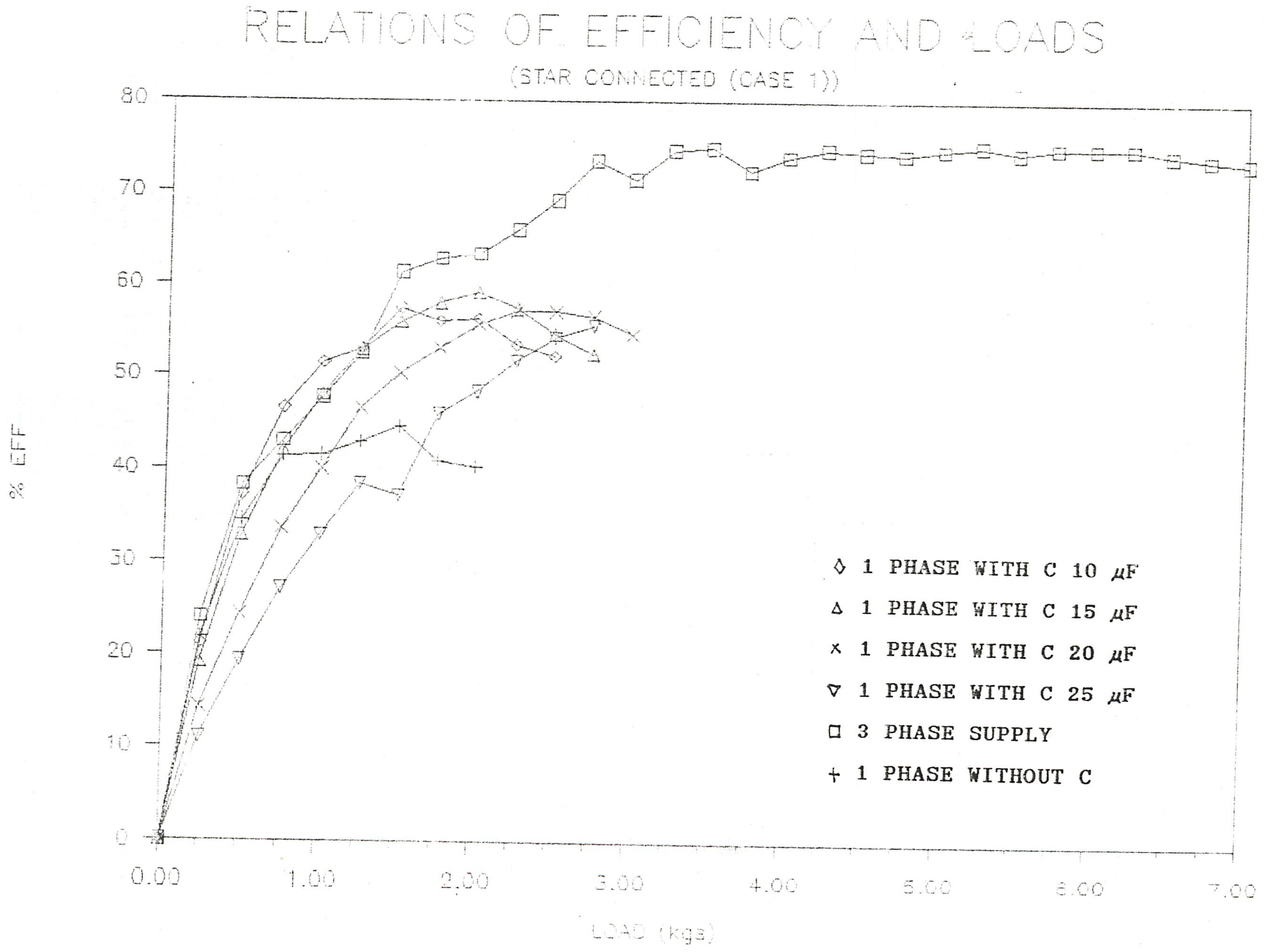


RELATIONS OF EFFICIENCY AND SLIP
(STAR CONNECTED)
% EFF
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.001
0.013
0.025
0.037
0.049
0.061
0.073
0.085
0.097
0.109
0.121
0.133
0.145
SLIP
1 PHASE WITHOUT C
1 PHASE WITH C (CASE 1)
1 PHASE WITH C (CASE 2)
3 PHASE SUPPLY

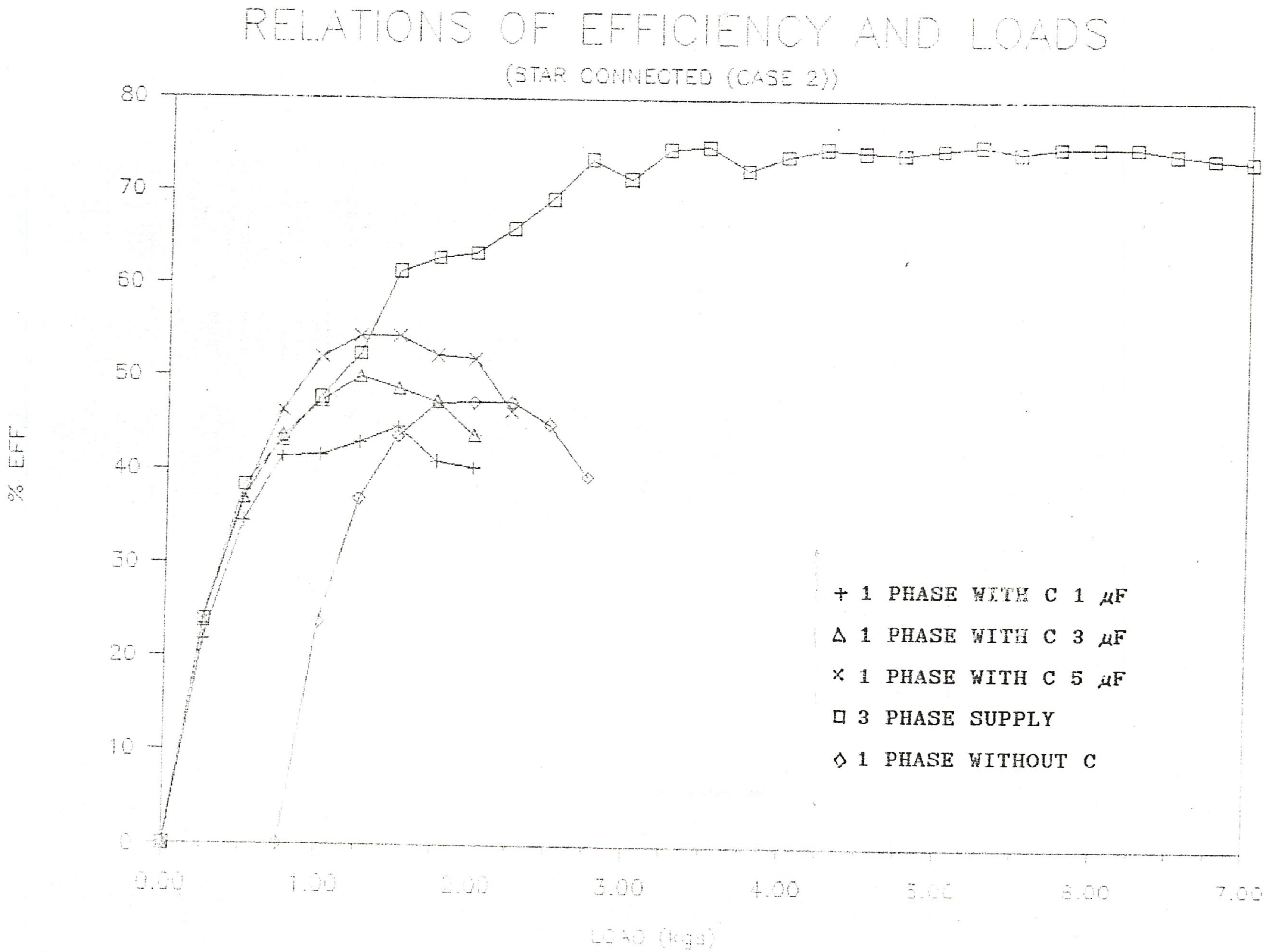

RELATIONS OF EFFICIENCY AND LOADS
(DELTA CONNECTED (CASE1))
80
70
60
50
40
30
20
10
0
% EFF
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
LOAD (kgs)
3 PHASE SUPPLY
1 PHASE WITHOUT C
1 PHASE WITH C 30 μF


RELATIONS OF EFFICIENCY AND LOADS
(DELTA CONNECTED (CASE1))
% EFF
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
LOAD (kgs)
1 PHASE WITH C 30 μF
1 PHASE WITH C 35 μF
1 PHASE WITH C 40 μF

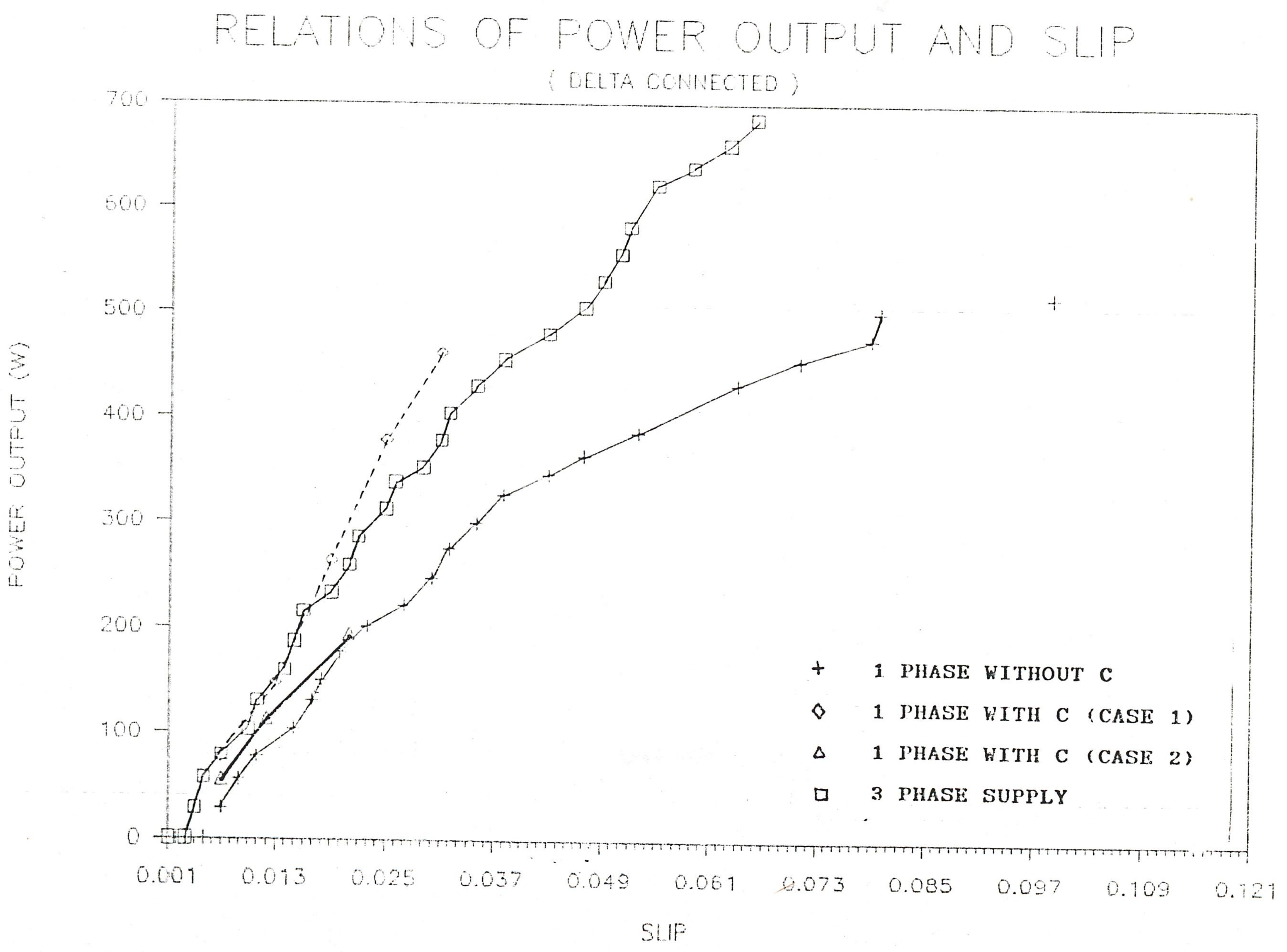

RELATIONS OF EFFICIENCY AND LOADS
(DELTA CONNECTED (CASE 2))
80
70
60
50
40
30
20
10
0
% EFF
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
LOAD (kgs)
1 PHASE WITH C 1 µF
1 PHASE WITH C 5 µF
1 PHASE WITH C 10 µF
1 PHASE WITH C 15 µF
3 PHASE SUPPLY
1 PHASE WITHOUT C



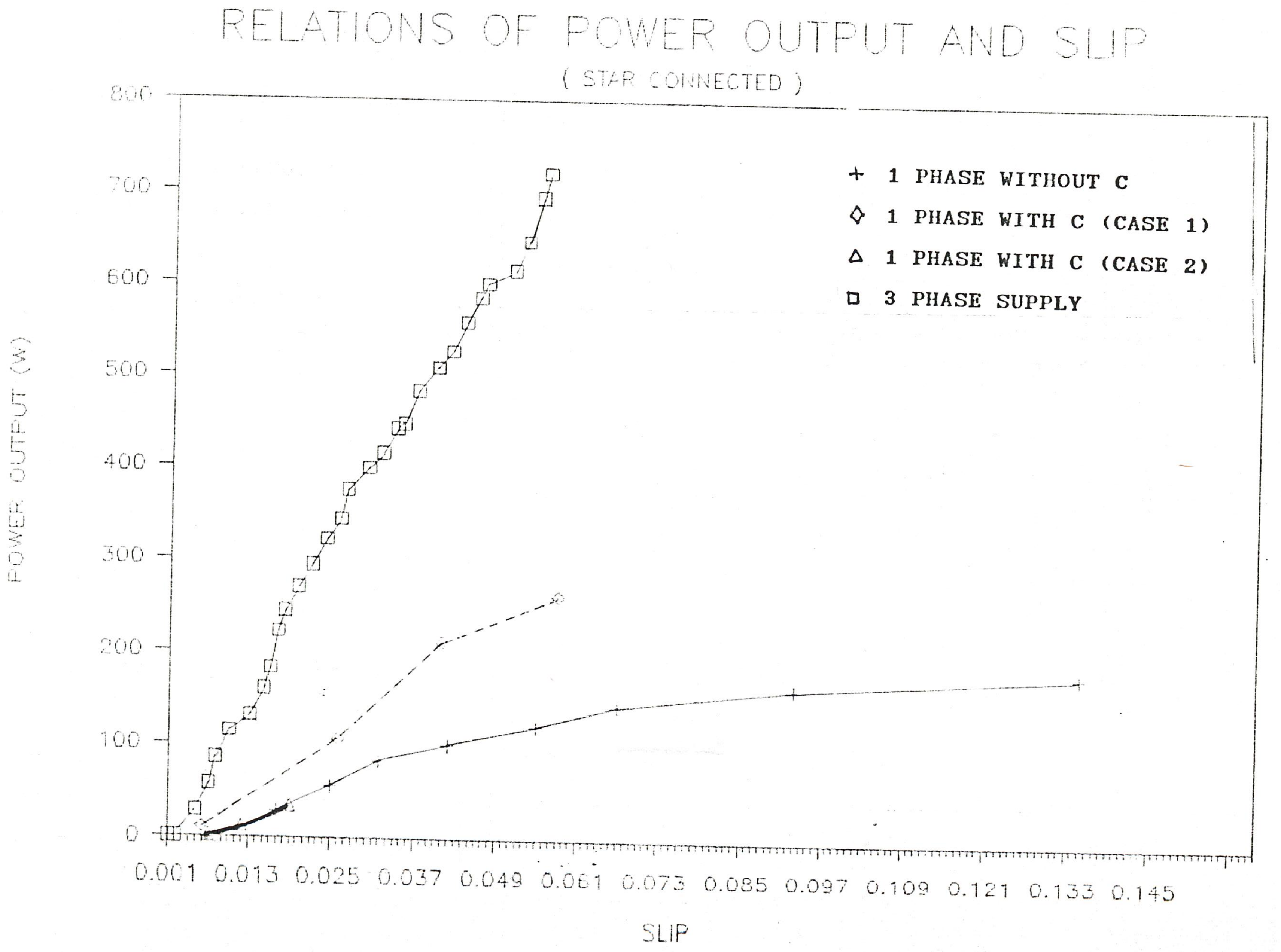
RELATIONS OF EFFICIENCY AND LOADS
(STAR CONNECTED (CASE 1))
80
70
60
50
40
30
20
10
0
% EFF
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
LOAD (kgs)
◇ 1 PHASE WITH C 10 μF
△ 1 PHASE WITH C 15 μF
× 1 PHASE WITH C 20 μF
▽ 1 PHASE WITH C 25 μF
□ 3 PHASE SUPPLY
+ 1 PHASE WITHOUT C



RELATIONS OF EFFICIENCY AND LOADS
(STAR CONNECTED (CASE 2))
% EFF
LOAD (kgs)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
+ 1 PHASE WITH C 1 μF
Δ 1 PHASE WITH C 3 μF
× 1 PHASE WITH C 5 μF
□ 3 PHASE SUPPLY
◊ 1 PHASE WITHOUT C



RELATIONS OF POWER OUTPUT AND SLIP
(DELTA CONNECTED)
700
600
500
400
300
200
100
0
POWER OUTPUT (W)
0.001
0.013
0.025
0.037
0.049
0.061
0.073
0.085
0.097
0.109
0.121
SLIP
1 PHASE WITHOUT C
1 PHASE WITH C (CASE 1)
1 PHASE WITH C (CASE 2)
3 PHASE SUPPLY



RELATIONS OF POWER OUTPUT AND SLIP
(STAR CONNECTED)
POWER OUTPUT (W)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0.001 0.013 0.025 0.037 0.049 0.061 0.073 0.085 0.097 0.109 0.121 0.133 0.145
SLIP
1 PHASE WITHOUT C
1 PHASE WITH C (CASE 1)
1 PHASE WITH C (CASE 2)
3 PHASE SUPPLY

บทที่ 6

บทสรุปและบทวิจารณ์

6.1 บทสรุป

1. การจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1เฟสให้แก่มอเตอร์ 3 เฟส ตามสภาพปกติจะทำงานไม่ได้ คือมอเตอร์จะไม่วิ่ง ดังนั้นจึงต้องมีตัวช่วยขับ หรือ ตัวเฟสบาลานเซอร์ (Phase Balancer,หรือคือตัวคาปาซิเตอร์) นำมาต่อคร่อมที่ขั้วขดลวดของมอเตอร์ที่ไม่ได้จ่ายแรงดันไฟฟ้า ประสิทธิภาพและกำลังงานของมอเตอร์จะตกลงจากสภาพใช้งานปกติ (มอเตอร์ทำงานสภาพปกติที่ 3 เฟส)

2. ในเงื่อนไขของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาในเรื่องของประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สูงที่สุด ค่าคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อนี้ จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเป็นค่าคาปาซิเตอร์ที่ใช้ได้ที่สลิป (slip) ค่าหนึ่ง ๆ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด ส่วนในเงื่อนไขอื่น ๆ เช่น ค่าคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการเริ่มเดินมอเตอร์ (start) หรือ ค่าคาปาซิเตอร์ที่ให้ค่ามุมประกอบกำลัง (power factor) ที่ดีที่สุด หรือ แรงบิดที่ดีที่สุด จะไม่ใช่ค่าคาปาซิเตอร์ค่านี้

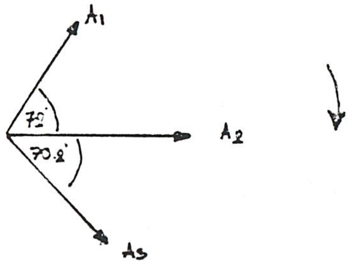
3. ค่าคาปาซิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณที่นำมาใช้นั้น จะใช้ได้ในช่วงจำกัด คือรับภาระ (load) ได้ในชวงที่แคบกว่า มอเตอร์ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส โดยกระแสที่เข้าขดของมอเตอร์จะเกินพิกัดที่อยู่บนแผ่นป้ายประจำเครื่อง (nameplate) เนื่องมาจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส ถึงแม้ว่าจะมีค่าคาปาซิเตอร์มาต่อคร่อมขดลวดของมอเตอร์ ก็จะไม่สามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมขดลวดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 220 V เหมือนกับสภาพปกติในการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้แก่มอเตอร์ ดังนั้นมอเตอร์ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสจึงรับภาระได้จำกัด

4. ในทุกกรณีของการต่อขดลวดแบบ star หรือ delta นั้น ค่าคาปาซิเตอร์ที่นำมาใช้นั้นซึ่งจะได้มาจากการคำนวณ ยิ่งค่าคาปาซิเตอร์ยิ่งมีค่าสูงขึ้นมากจะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากกระแสเกินพิกัดในขดลวดของมอเตอร์

5. ในทุกกรณีของการต่อขดลวดแบบ star หรือ delta นั้น เมื่อทำการสลับตำแหน่งต่อค่าคาปาซิเตอร์ที่คร่อมขดลวดของมอเตอร์ ให้ไปยังอีกขั้วหนึ่ง จะทำให้มอเตอร์มีทิศทางการหมุนที่กลับทิศจากเดิม เพราะผลรวมของสนามแม่เหล็กหมุนที่เวลาต่าง ๆ จะมีทิศทาง ซึ่งจะมีค่าตรงข้ามกับการต่อค่าคาปาซิเตอร์ในอีกกรณีหนึ่ง สามารถพิสูจน์ได้จากสมการและทำการวาดกราฟการเคลื่อนที่ของผลรวมสนามแม่เหล็กลัพธ์ได้ ซึ่งค่าตัว

เลขที่ใช้จะได้มาจากการทดลอง

5.1 กรณีการต่อขดลวดแบบ delta แบบที่ 1



รูปที่ 6.1 แสดงทิศเฟสของกระแสในขดลวดของมอเตอร์ โดยต่อขดลวดแบบ delta แบบที่ 1

$F_a = 1.2\ K\ \cos(\phi)\cos(wt)$

$F_b = 1.8\ K\ \cos(\phi-120)\cos(wt+72)$

$F_c = 1.5\ K\ \cos(\phi-240)\cos(wt+142.2)$

$F = F_a + F_b + F_c$

โดยให้ค่า K เป็นค่าคงที่ ซึ่งจะสมมติให้ค่า K = 1 แทนค่า wt เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

wt = 0 $F_a = 1.2$

$F_b = -0.278 + j0.482$

$F_c = 0.593 + j1.026$

$F = 1.515 + j1.508$

$\omega t = 15 \quad F_a = 1.159$

$F_b = -0.047 + j0.082$

$F_c = 0.6915 + j1.198$

$F = 1.8035 + j1.28$

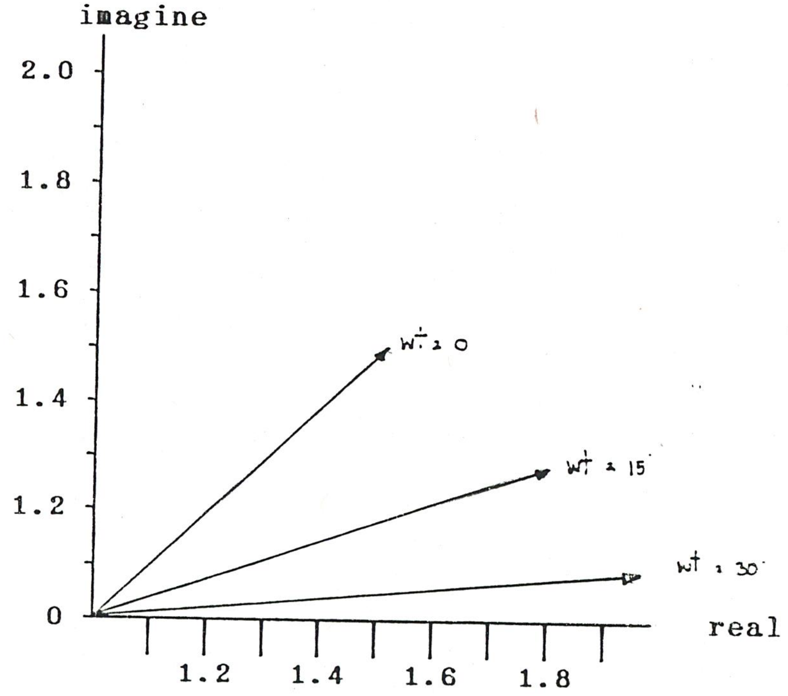
$\omega t = 30 \quad F_a = 1.039$

$F_b = 0.187 - j0.324$

$F_c = 0.743 + j1.287$

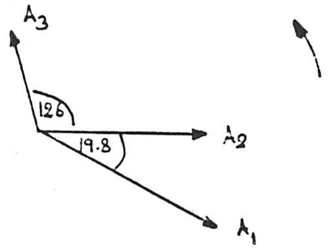
$F = 1.969 + j0.963$

นำค่าผลรวมสนามแม่เหล็กลัพธ์มาวาดกราฟ



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟ ผลรวมค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์

5.2 กรณีการต่อขดลวดแบบ delta แบบที่ 2



รูปที่ 6.3 แสดงทิศเฟสของกระแสในขดลวดของมอเตอร์ โดยขดลวดต่อแบบ delta แบบที่ 2

F_a = 1.98 K cos(ϕ)cos(wt)

F_b = 1.1 K cos(ϕ-120)cos(wt-19.8)

F_c = 0.98 K cos(ϕ-240)cos(wt-145.8)

F = $F_a + F_b + F_c$

โดยให้ค่า K เป็นค่าคงที่ ซึ่งจะสมมติให้ค่า K = 1 แทนค่า wt เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

wt = 0 F_a = 1.98

F_b = -0.518 + j0.896

F_c = 0.405 + j0.7

F = 1.867 + j1.596

wt = 15 F_a = 1.913

F_b = -0.548 + j0.949

$F_c = 0.32 + j0.554$

$F = 1.685 + j1.503$

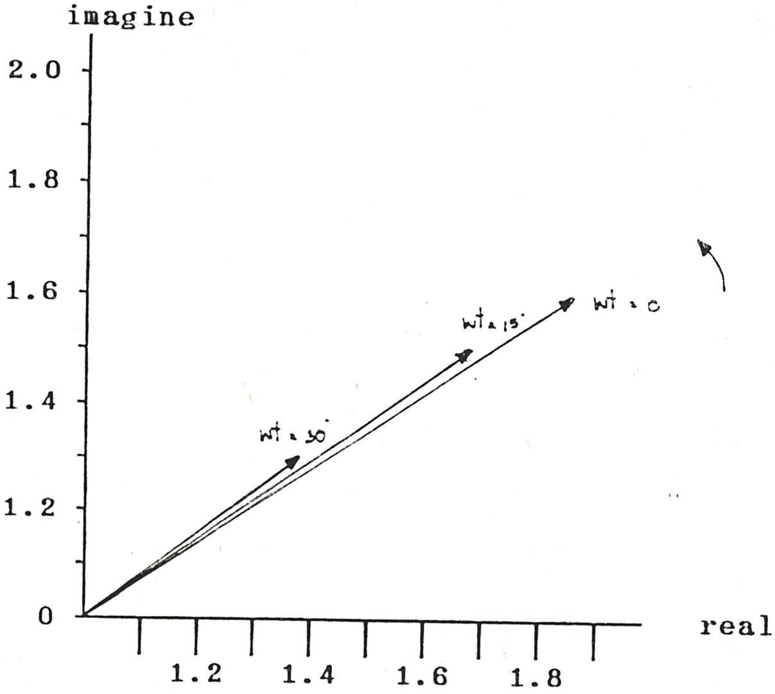
wt = 30 $F_a = 1.715$

$F_b = -0.542 + j0.938$

$F_c = 0.214 + j0.369$

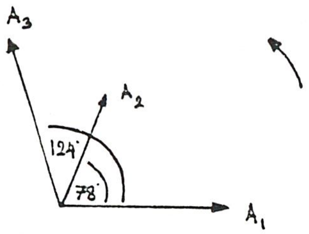
$F = 1.387 + j1.307$

นำค่าผลรวมสนามแม่เหล็กลัพธ์มาวาดกราฟ



รูปที่ 6.4 แสดงกราฟ ผลรวมค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์

5.3 กรณีการต่อขดลวดแบบ star แบบที่ 1



รูปที่ 6.5 แสดงทิศเฟสของกระแสในขดลวดของมอเตอร์ โดยขดลวดต่อแบบ star แบบที่ 1

$F_a = 0.78\ K\ \cos(\phi)\cos(wt)$

$F_b = 0.58\ K\ \cos(\phi-120)\cos(wt-78.0)$

$F_c = 1.30\ K\ \cos(\phi-240)\cos(wt-124.0)$

$F = F_a + F_b + F_c$

โดยให้ค่า K เป็นค่าคงที่ ซึ่งจะสมมติให้ค่า K = 1 แทนค่า wt เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

wt = 0

$F_a = 0.78$

$F_b = -0.0609 + j0.105$

$F_c = 0.364 + j0.631$

$F = 1.0831 + j0.736$

wt = 15

$F_a = 0.753$

$F_b = -0.1315 + j0.228$

F_c = 0.2115 + j0.366

F = 0.833 + j0.594

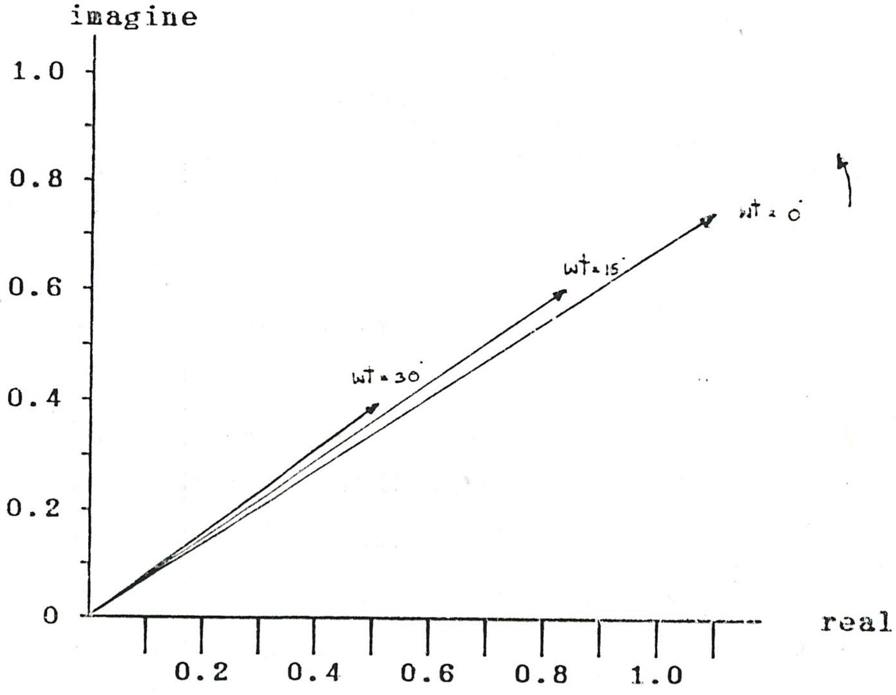
wt = 30 F_a = 0.675

F_b = -0.194 + j0.336

F_c = 0.045 + j0.078

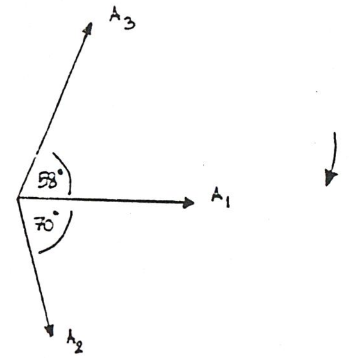
F = 0.526 + j0.414

นำค่าผลรวมสนามแม่เหล็กลัพธ์มาวาดกราฟ



รูปที่ 6.6 แสดงกราฟ ผลรวมค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์

5.4 กรณีการต่อขดลวดแบบ star แบบที่ 2



รูปที่ 6.7 แสดงทิศเฟสของกระแสในขดลวดของมอเตอร์ โดยขดลวดต่อแบบ star แบบที่ 2

$F_a = 0.52\ K\cos(\phi)\cos(wt)$

$F_b = 0.82\ K\cos(\phi-120)\cos(wt+70.0)$

$F_c = 1.28\ K\cos(\phi-240)\cos(wt-58)$

$F = F_a + F_b + F_c$

โดยให้ค่า K เป็นค่าคงที่ ซึ่งจะสมมติให้ค่า K = 1 แทนค่า wt เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

wt = 0

$F_a = 0.52$

$F_b = -0.139 + j0.24$

$F_c = -0.339 - j0.587$

$F = 0.042 - j0.347$

wt = 15

$F_a = 0.502$

$F_b = -0.0355 + j0.06$

$F_c \; = \; -0.468 - j0.81$

$F \; = \; -0.0015 - j0.75$

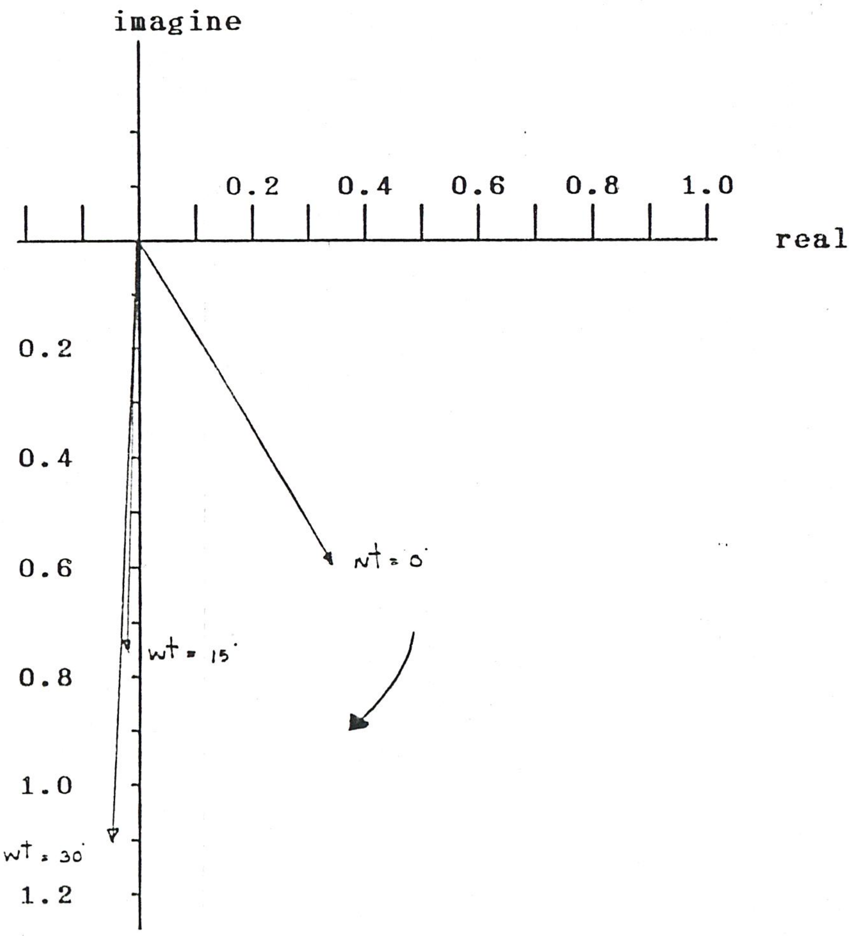
wt = 30 $\quad F_a \; = \; 0.45$

$F_b \; = \; 0.071 - j0.123$

$F_c \; = \; -0.565 - j0.979$

$F \; = \; -0.044 - j1.102$

นำค่าผลรวมสนามแม่เหล็กลัพธ์มาวาดกราฟ



รูปที่ 6.8 แสดงกราฟ ผลรวมค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์

6.2 บทวิจารณ์

1. ในกรณีขดลวดของมอเตอร์ต่อแบบ delta ค่าคาปาซิเตอร์ที่นำมาใช้ซึ่งได้จากการคำนวณ ผลที่ได้จากการทดลองโดยจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดจะมีค่าที่ค่อนข้างถูกต้อง แต่อาจจะมีการผิดพลาดเล็กน้อย เนื่องจากค่าคาปาซิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณนั้น จะไม่สามารถหาค่าคาปาซิเตอร์ที่มีค่าตรงตัวได้โดยพอดี และเครื่องมือวัดที่ใช้เช่น ตาชั่ง, แอมป์มิเตอร์ และอื่น ๆ จะมี scale ที่หยาบทำให้ลำบากต่อการบันทึกค่า

2. ในกรณีขดลวดของมอเตอร์ต่อแบบ star ผลการทดลองนั้น ค่าคาปาซิเตอร์ที่หาได้จะทำให้ได้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำสุด อาจจะมีสาเหตุเนื่องมาจาก ค่าคาปาซิเตอร์ที่ใช้ทดลองนั้นซึ่งได้จากการคำนวณจะมีค่าที่ต่ำ และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ ค่าที่เปลี่ยนก็จะอยู่ในช่วงที่แคบ ๆ ทำให้ค่าที่อ่านจากอุปกรณ์การทดลองเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งการอ่านค่าต่าง ๆ อาจจะเกิดจากความผิดพลาดของผู้อ่าน และรวมไปถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองด้วย

3. ในกรณีที่ขดลวดของมอเตอร์ต่อแบบ star นั้น จากการทดลองที่มีความผิดพลาดอาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก ค่าที่เกิดจากการ differrential จากสมการอาจจะได้ค่าที่สูงสุดหรือต่ำสุด ซึ่งค่าที่ทำการทดลองอาจจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำสุด ดังนั้นเมื่อไปดูค่าคาปาซิเตอร์อีกค่าหนึ่งซึ่งได้จากการคำนวณ ผลปรากฏว่าค่าคาปาซิเตอร์จะมีค่าที่สูงมาก จะทำการทดสอบไม่ได้ เนื่องจากกระแสเกิดพิกัดของมอเตอร์

4. ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นเพียงการศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เมื่อจ่ายไฟระบบ 1เฟสขณะมอเตอร์ทำงานเข้าสู่สภาวะ steady state ผลการทดลองที่ได้บางกรณีอาจจะไม่สอดคล้องกับการทำงานจากทฤษฎี ซึ่งจากทฤษฎีผลที่ได้จะได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์จะไม่คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมที่มอเตอร์ทำงาน

บทที่ 7
การพิจารณาทางหลักเศรษฐศาสตร์และหลักวิศวกรรมศาสตร์ ในการนำมาใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 1 เฟส และ การประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟฟ้าแหล่งจ่าย 1 เฟส

การพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์

ในการพิจารณาตัดสินปัญหาเศรษฐกิจของระบบเศรษฐกิจเอกชนนั้น จะพิจารณาถึงราคาเป็นตัวตัดสิน และเป็นเครื่องชี้ให้ทราบว่าระบบเศรษฐกิจควรจะผลิตสินค้าและบริการใดบ้าง เป็นจำนวนเท่าใด ผลิตอย่างไร และผลิตเพื่อใครบ้าง การตัดสินของแต่ละคน จะเป็นไปในทางที่ทำให้เขา ได้รับความพอใจสูงสุด

เศรษฐศาสตร์ เป็นวิชาทางสังคมศาสตร์ที่ศึกษาถึงพฤติกรรมของมนุษย์และสังคมในการตัดสินใจเลือกใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายทางมาใช้ในการผลิตสินค้าและบริการต่างๆ อย่างประหยัดที่สุดหรืออย่างมีประสิทธิภาพทางเทคนิคสูงสุด และหาทางจำแนกแจกจ่ายไปบำบัดความต้องการของมนุษย์ในสังคมให้ได้รับความพอใจสูงสุดหรืออย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด การเลือกตัดสินใจ ตามปกติคนเราจะต้องมีการเลือกตัดสินใจอย่างใดอย่างหนึ่งอยู่ตลอดเวลา เช่น ต้องเลือกผลิตวิธีใด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด การเลือกใช้แรงงานและทุนประเภทใดจึงเกิดการประหยัดและมีต้นทุนการผลิตต่ำ นอกจากนี้การประพฤติตนเป็นผู้เลือกซื้อที่ฉลาด จะนำไปสู่การเป็นผู้บริโภคที่ฉลาด คือรู้ว่าตนเองต้องการอะไรมากที่สุด และวิธีที่ดีที่สุดที่จะได้สิ่งนั้นมา ซึ่งอาจทำได้โดยกำหนดขอบเขตของความต้องการอีกทั้งต้องการ อีกทั้งต้องคำนึงถึงงบประมาณค่าใช้จ่ายต่างๆ นอกจากนี้จะต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน

จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้ ในการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะคำนึงถึงราคาเป็นสำคัญในการเลือกตัดสินใจกระทำสิ่งใดๆ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คือ การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเมื่อต่อกับระบบไฟ 1 เฟส ซึ่งเป็นการประยุกต์การใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยใช้อุปกรณ์คือ capacitor เป็นตัวทำให้เฟสสมดุล ดังนั้นในการนำมาใช้งานจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นค่าจำนวนหนึ่ง อีกทั้งกรณีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสมาใช้งาน นำมาเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ว่าในการนำมาใช้งานใดงานหนึ่งนั้น (กำหนดให้เป็นตัวแปรที่คงที่) การประยุกต์การใช้งานหรือการ

ใช้งานปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส นั้นการใช้งานประเภทใดให้ประโยชน์ที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์

การพิจารณาเชิงวิศวกรรมศาสตร์

ลักษณะต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส คือ

1. มีโครงสร้างที่ง่าย
2. สะดวกในการใช้งาน
3. แข็งแรงและทนทาน ไม่ค่อยมีปัญหา
4. การบำรุงรักษาและการซ่อมแซมทำได้ง่าย
5. มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดมาตรฐานธรรมดามีสมบัติความเร็วรอบคงที่ แต่มีมอเตอร์ชนิดอื่นๆอีกที่มีสมบัติสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหรือความเร็วรอบหลายช่วงค่า ซึ่งทำให้ควบคุมความเร็วรอบได้ด้วย
6. มีราคาถูก

ช่วงพิกัดกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้กว้างมากจากไม่กี่วัตต์ไปจนถึงหลายพันกิโลวัตต์ และค่าศักดาไฟฟ้าที่ใช้สำหรับมอเตอร์จากสิบสิบโวลต์ไปจนถึงเป็นพันพันโวลต์

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีข้อได้เปรียบจากแหล่งจ่ายไฟไปสู่มอเตอร์ สามารถใช้ได้กับไฟในบ้าน แต่มีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสกล่าวคือ

1. ต้องการวงจรสตาร์ทเป็นพิเศษ
2. สมบัติต่างๆด้อยกว่า เช่น ประสิทธิภาพ เพาเวอร์แฟกเตอร์ เป็นต้น
3. ในขนาดเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะมีราคาสูงกว่า
4. โดยที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกินกระแสขณะสตาร์ทสูง ดังนั้นจะไม่มีมอเตอร์ขนาดใหญ่ในท้องตลาด (ขนาดถึงประมาณ 1 กิโลโวลต์เป็นสูงสุด)

กิตติกรรมประกาศ

ในปีการศึกษา 2536 ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากการได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลาย ๆฝ่าย ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบคุณมาไว้ ณ. โอกาสนี้ด้วย

อาจารย์วีรศักดิ์ วงศ์วิวัติ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์พิชิต ลำยอง อาจารย์ศุภกิจ จุตะวิริยะ อาจารย์อานันทวัฒน์ คุณากร อาจารย์สมภพ ผลไม้ ซึ่งให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับการทำโครงงาน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งมิสามารถกล่าวชื่อได้ทั้งหมด ณ.ที่นี้ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดมา

หนังสืออ้างอิง

1. รศ.สัมพันธ์ หาญชเล , "เครื่องกลไฟฟ้า 2 ", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, สิงหาคม 2533
2. สุพัฒน์ รุ่งเรือง ,"มอเตอร์สามเฟสก็ใช้กับไฟเฟสเดียวได้",เทคนิค 75,สิงหาคม 2534
3. ณรงค์ ชอนตะวัน,"มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ", เอราวัณการพิมพ์
4. มงคล ทองสงคราม,"เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ", บริษัท รามาการพิมพ์ จำกัด, 2535
5. มงคล ทองสงคราม,"การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า",บริษัท รามาการพิมพ์ จำกัด,2535
6. ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทโรสถ,มาบูชิ มาการิซาวา,"เทคนิคการซ่อมแซมเลือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ",บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2533
7. SEBASTIAO E.M.DE OLIVEIRA , " OPERATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS CONNECTED TO ONE-PHASE SUPPLY",IEEE TRANS. ON ENERGY CONVERSION , VOL.5 NO.4 DECEMBER 1990
8. WILLIAM D.STEVENSON,JR.,"ELEMENT OF POWER SYSYEM ANALYSIS", MCGRAW-HILL INTERNATIONNAL EDITION USA.,1982
9. S.S.MURPHY,G.J.BERG, B.SINGH, C.S.JHA, B.P.SINGH,"TRANSIENT ANALYSIS OF A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH SINGLE-PHASE SUPPLY",IEEE TRANS.ON POWER AND SYSTEM, VOLPAS.102 NO.1 JANUARY 1983
10. S.E.M.OLIVEIRA, "STARTING TRANSIENTS OF SATURATED INDUCTION MOTORS WITH SERIES CAPACITORS ON THE SUPPLY",IEEE TRANS. ON ENERGY CONVERSION, VOL EC-1 NO.3 SEPTEMBER 1986