

ปีการศึกษา 2541



การศึกษาการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากพลังงานลมด้วยโปรแกรม simulink
A study of the simulation of wind turbine induction generator with using simulink

โดย

1. นายกรกช พงนสุนทร
2. นายกิตติ เนตรสาขาวัฒน์
3. นายคณัมพร บุญรักษา
4. นายจิตติพันธุ์ พิจนิก

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วิจิตร กิณเรศ

ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

เลขหน้.....
เลขทะเบียน..... 34158
วัน, เดือน, ปี 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ 2541

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากพลังงานลมด้วยโปรแกรม simulink

ผู้จัดทำ

1. นายกรกช พจนสุนทร รหัสประจำตัว 38014006
2. นายกิตติ เนตรสชาวัฒน์ รหัสประจำตัว 38014023
3. นายคณันมพร บุญรักษา รหัสประจำตัว 38014048
4. นายจิตติพันธุ์ พิจนิก รหัสประจำตัว 38014067



[Handwritten signature]

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. วิจิตร กิณเรศ)

[Handwritten signature]

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาระบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากพลังงานลมด้วยโปรแกรม simulink

นายกรรช พจนสุนทร

นายกิตติ เนตรสาขาวัฒน์

นายคณันมพร บุญรักษา

นายจิตติพันธุ์ พิฉฉิก

ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้ ได้อธิบายถึงการจำลองระบบการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งสามารถป้อนกำลังเข้าได้ทั้งสองทิศทาง (DFIG) ที่สามารถปรับความเร็วรอบในระบบที่มีการคืนพลังงาน ระบบนี้ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์สองชุด ได้แก่ คอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Machine side converter) และคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย (Front-end converter) ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดถูกเชื่อมต่อกันด้วยแรงดันเชื่อมโยง DC (DC-Link) โดยใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองชุด

เมื่อต่อระบบเข้ากับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า จะมีส่วนของการควบคุมที่เป็นอิสระต่อกันระหว่างแรงบิดทางไฟฟ้ากับกระแสกระตุ้นทางด้านโรเตอร์ และมีส่วนของการปรับ tracking เพื่อพลังงานที่เหมาะสม ด้านการใช้งาน จะมีการปรับความเร็วรอบอยู่ในช่วงความเร็วที่ Subsynchronous และ Supersynchronous

การควบคุมทั้งหมดเป็นการจำลองระบบโดยใช้ Matlab และ Simulink ผลการทดลองสามารถสังเกตได้จากโปรแกรมด้วยการแปรค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study of the simulation of wind turbine induction generator with using simulink

Mr. Korakot Photjanasuntorn

Mr. Kitti Nadesakhawat

Mr. Kakanamporn Bunraksa

Mr. Jittiphan Pijchig

Dr. Vijit Kinnares Advisor

Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

1998

Abstract

This project describes the simulation of a Seherbius scheme for a variable speed Doubly fed induction generator (DFIG). The scheme consists of two front-end converters with dc link, connected between the rotor and the stator of machine. The converters are controlled by using vector control technique for grid-connected operation.

In the grid-connected case, the control strategy has resulted in an independent control of the electrical torque and rotor excitation current. Additionally strategy for optimum energy capture is presented by machine driven wind turbine and connected to the grid. Strategy for power limitation for wind turbine driven DFIG is illustrated.

Operation at subsynchronous and supersynchronous speed of grid-connected case has been varied and transition through synchronous speed has been achieved.

The overall control strategies are simulated as simulation control using Matlab with Simulink to notice experimental results happened from varifying relational parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูปภาพ	ก.1
สารบัญตาราง	ข
สัญลักษณ์	ค.1
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทมและกังหัน	2
2.1 ทม	2
2.2 กังหันลม	5
2.3 พลังงานลม	9
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการ	16
3.1 การควบคุมพลังงานสลลิปของเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ (Slip Power Controlled Wound Rotor Induction Machine)	16
3.2 การวิเคราะห์การควบคุมด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียด	17
3.3 ชุดสแตติกคอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำงานในย่านต่ำกว่าความถี่เชิงโครนัส	20
3.4 เพาเวอร์แฟกเตอร์	23
3.5 การทำงานในย่านจำกัดที่ต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัส	25
3.6 อิทธิพลของฮาร์โมนิก	27
3.7 เครื่องจักรที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก (Induction Machine)	28
3.8 Parameter of Wound Rotor Induction Machine	28
3.9 โครงสร้าง (Consturction)	29
3.10 หลักการทำงาน (Principal of Operation)	30
3.11 การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ (Speed Control of an Induction Machine)	32
3.12 การควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำโดยวิธีการควบคุมแบบเวคเตอร์	35
3.13 Front-End Converter	36
3.14 วิธีการควบคุม Front-End Converter	36
3.15 VSI (Voltage source inverter)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 Grid-connected DFIG driven by a wind turbine	55
4.1 บทนำ	55
4.2 กำลังและแรงบิดที่ได้มาจากกังหันลม	55
4.3 ข้อจำกัดของความเร็วในการทำงาน	56
4.4 Optimum speed tracking	60
บทที่ 5 การออกแบบและการควบคุม	63
5.1 โมเดลของ Front-end converter	63
5.2 การออกแบบลูปควบคุม (Control Loop Design)	65
5.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ Field ในการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำ (The Field Orientation Principle in Control of Induction Machines)	69
5.4 การแปลงค่าต่างๆ ในเครื่องจักรเหนี่ยวนำซึ่งใช้ใน Project “Simulation of wind turbine”	73
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	80
6.1 การจำลองระบบควบคุม Front-end converter	80
6.2 ผลการทดลอง	83
6.3 การจำลองระบบการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์	86
บทที่ 7 บทวิจารณ์ และสรุป	94
7.1 บทวิจารณ์	94
7.2 บทสรุป	94
ภาคผนวก (ก)	96
ภาคผนวก (ข)	121
กิตติกรรมประกาศ	123
เอกสารอ้างอิง	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการเกิดลมทั่วโลก	3
2.2	แสดงการเกิดลมเฉพาะที่	4
2.3	เครื่องวัดความเร็วลมและเครื่องแสดงทิศทางลม	5
2.4	กังหันแนวนอนชนิดต่างๆ	6
2.5	กังหันแนวนอนชนิดต่างๆ(ต่อ)	7
2.5	กังหันแนวตั้งชนิดต่างๆ	8
2.6	การขยายตัวของกระแสในรูปแบบของ Benz	10
2.7	ความสัมพันธ์ของ C_p ในฟังก์ชันของ interference factor เมื่อ $C_p = 4a(1-a)^2$	12
2.8	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Torque coefficient (C_T) กับ tip speed ratio (λ) ของกังหันแบบ high solidity , low solidity และ ideal criterion	14
3.1	การควบคุมด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียส (Static Scherbius drive)	16
3.2	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของ โรเตอร์	17
3.3	ระบบเซอร์เบียสสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำชนิดวาล์วโรเตอร์	20
3.4	เครื่องจักรเหนี่ยวนำและสแตติกคอนเวอร์เตอร์ชนิด คาตาคดซึ่งให้ความดีต่ำกว่าความดีเชิงโครนัส	21
3.5	คุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบ ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ	23
3.6	ทางเดินของกระแสที่หลายกรณีแรงพิกัดคงที่	26
3.7	วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ	29
3.8	Induce Rotor Current and Torque Direction (Two-pole Machine)	31
3.9	แรงบิด ต่อ ค่า Slip ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	การควบคุมความเร็วรอบของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ชนิดวาวด์โรเตอร์ โดยปรับความต้านทานภายนอก	34
3.11	ลักษณะของ Front-end converter	36
3.12	วิธีควบคุมสเกลาร์ด้วย PI control	37
3.13	วิธีควบคุมสเกลาร์ด้วย hysteresis current control	38
3.14	วิธีควบคุมแวกเตอร์	39
3.15	AC to AC Converter with DC-link	40
3.16	วงจร Half Wave Rectifier Load R และ Voltage Waveform	41
3.17	Half Wave Rectifier of Load R-L และ Voltage Waveform	41
3.18	Full Wave Bridge Rectifier With R Load	43
3.19	Waveform ของกระแสที่ไหลผ่าน ไดโอดและแรงดันตกคร่อม ไดโอด	43
3.20	Full Wave Bridge Bridge Rectifier With R-L Load	44
3.21	Waveform ของกระแสที่ไหลผ่าน ไดโอด แรงดันแหล่งจ่ายและขาออก	44
3.22	Voltage and Current Waveform	45
3.23	Voltage and Current Waveform	45
3.24	3 Phase Rectifier With R-L Load	46
3.25	วงจรพื้นฐานของอินเวอร์สเตอร์	48
3.26	แผนภาพสำหรับการทำงานของวงจรคู่สวิตช์และวงจรอินเวอร์สเตอร์	48
3.27	Inverter Circuit With R-L Load และแผนภาพแสดงช่วงการนำกระแสของ Thyristor และ Diode	49
3.28	Waveform ของกระแสและแรงดันในวงจรอินเวอร์สเตอร์ที่ต่อ โหลด R-L	50
3.29	3 Phase Inverter With Star Load	51
3.30	ไจเคิลการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวสำหรับวงจรแบบ 3 Branch	51
3.31	แผนภาพแสดงแรงดันเฟสทั้ง 3 เฟส ขณะ On Load	51
3.32	วงจรการทำงานของสวิตช์ประกอบการพิจารณาการทำงานของ PWM	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.33	Bipolar PWM Waveform of Output Voltage For Full Bridge Converter	53
3.34	Unipolar PWM Waveform of Output Voltage Waveform For Full Bridge Converter	54
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง , และ	56
4.2	VA โรเตอร์และกระแส	59
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจากกังหันลมกับความเร็วรอบ	59
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดจากกังหันลมกับความเร็วรอบ	60
5.1	วงจรมุมลัดของ front-end converter ใน d-q coordinate	63
5.2	โครงสร้างของการควบคุมเวกเตอร์สำหรับ front-end converter	66
5.3	รูปการควบคุมกระแสของ front-end converter	67
5.4	รูปควบคุมแรงดันDC-link	68
5.5	วงจรมุมลัดของเครื่องจักร ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	73
5.6	โครงสร้างการควบคุมเวกเตอร์ของ DFIG	79
6.1	บล็อกไดอะแกรมของรูปควบคุมกระแส	80
6.2	บล็อกไดอะแกรมของรูปควบคุมแรงดัน	80
6.3	บล็อกไดอะแกรมของ front-end converter ช่วง rectifying mode	81
6.4	บล็อกไดอะแกรมของ front-end converter ช่วง inverting mode	82
6.5	Inverting Mode	83
6.6 ก	การตอบสนองเมื่อกระแสในแกน q เปลี่ยนแปลง	84
6.6 ข	แรงดันกับกระแส	84
6.7	การทำงานเมื่อกระแสตามแรงดัน	85
6.8	การทำงานเมื่อกระแสต้านแรงดัน	85
6.9	การตอบสนองของรูปควบคุมแรงดัน DC-link	86
6.10	บล็อกไดอะแกรมของระบบการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โคจรรวม	87
6.11	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.12	บล็อกไดอะแกรมของระบบการควบคุมเครื่องจักรหนึ่งขวนำแบบเวกเตอร์	89
6.13	แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องจักรหนึ่งขวนำ	90
6.14	กระแสสเตเตอร์ของเครื่องจักรหนึ่งขวนำ	90
6.15	กระแสสเตเตอร์ในแกนอ้างอิงหุคหนึ่งแบบ alfa-beta	91
6.16	เปรียบเทียบลักษณะของกระแสสเตเตอร์ และแรงดันสเตเตอร์	91
6.17	กระแสโรเตอร์ของเครื่องจักรหนึ่งขวนำ	92
6.18	กระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง direct ของเครื่องจักรหนึ่งขวนำ	92
6.19	กระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง quardrature ของเครื่องจักรหนึ่งขวนำ	93
6.20	การควบคุมค่ากระแสในวงจรควบคุมแบบClose Loop	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกังหันแนวแกนตั้ง และกังหันแนวแกนนอน	9
3.1	การเปรียบเทียบแรงดันสำหรับการทำงานของเร็คคิฟายเออร์ 3 เฟส	46
3.2	การทำงานของคู่สวิทช์และขนาดของแรงดันเอาต์พุต	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

V_s	=	แรงดัน rms ด้านสเตเตอร์
V_r	=	แรงดัน rms ด้านโรเตอร์
m, m_1, m_2	=	modulation depth, stator and rotor modulation depth
E	=	แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง
s	=	สลลิป
n	=	อัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์
L, R	=	ความเหนี่ยวนำและความต้านทานด้านแหล่งจ่าย
V_{ab}, V_{bc}	=	แรงดันระหว่างไลน์
V_a, V_b, V_c	=	แรงดันเฟสจากแหล่งจ่าย
$V_d, V_q, V_\alpha, V_\beta$	=	แรงดันแหล่งจ่ายแบบ 2 แกน
V_{d1}, V_{b1}, V_{c1}	=	แรงดันที่ขั้วของ 3 phase front-end converter
V_{d1}, V_{q1}	=	แรงดันที่ขั้วแบบ 2 แกน ของ front-end converter
$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$	=	แรงดันในแกน d และแกน q ในกรอบสเตเตอร์และโรเตอร์
$i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}, i_{rb}$	=	กระแส 3 เฟสด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์
$i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$	=	กระแสในแกน d และแกน q ในกรอบสเตเตอร์และโรเตอร์
i_a, i_b, i_c	=	กระแสอินพุท 3 เฟสใน front-end converter
i_d, i_q	=	กระแสอินพุทของแกน d และแกน q ใน front-end converter
i_{0s}, i_{0r}	=	กระแสเชื่อมโยงไฟตรงในสเตเตอร์และโรเตอร์คอนเวอร์เตอร์
I_{dc}	=	กระแสไฟตรงในอาร์มาเจอร์
I_m	=	ขนาดของกระแสไฟ 3 เฟส
$\omega_s, \omega_r, \omega_{slip}$	=	ความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่าย โรเตอร์และสลลิป
θ_v, θ_s	=	ตำแหน่งเวกเตอร์ของแรงดันแหล่งจ่ายและสเตเตอร์ฟลักซ์
θ_r	=	ตำแหน่งของโรเตอร์
θ_{slip}	=	มุมสลลิป
P, Q	=	แรงดันแอกทีฟและรีแอกทีฟ
C	=	ความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$F(s), F(z)$	=	ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน
ζ	=	ตัวประกอบการแกว่งของสัญญาณ
λ	=	พลาซม์ที่เกี่ยวข้อง
I_s, I_r, I_m, I_o	=	ความเหนี่ยวนำต่อเฟส
R_s, R_r	=	ความต้านทานต่อเฟส
σ	=	เฟคเตอร์การรั่วไหลของพลาซม์โดยรวม
σ_s	=	เฟคเตอร์การรั่วไหลของพลาซม์ด้านสเตเตอร์
i_{ms}	=	กระแสแรงแม่เหล็กกระตุ้นด้านสเตเตอร์
T_{ms}	=	ค่าคงตัวของเวลาด้านสเตเตอร์
p	=	คู่ขั้ว
K_c, K_i, K_e, K_w	=	ค่าเกณฑ์ของการควบคุม
a_c, a_i, a_e, a_w	=	พารามิเตอร์ต่างๆ ในการควบคุม
P_m, P_{opt}, P_{max}	=	กำลังทางกล กำลังที่เหมาะสม และ กำลังสูงสุด
$C_p, C_t, \lambda, \beta, r, \rho$	=	สัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์แรงบิด tip ratio pitch angle รัศมี และ ค่าความหนาแน่นของอากาศ
v	=	ความเร็วลม
B, J	=	ความฝืด ความเฉื่อย
T_e, T_m	=	แรงบิดทางกล แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า
T_{aux}	=	แรงบิดเสริม
δ	=	chopper duty cycle
T_s, T_W	=	เวลาการสุ่มของวงรอบกระแส และ วงรอบของความถี่รอบ
f_s	=	ความถี่ของการสวิตชิง
$K_m \phi_{dc}$	=	ค่าคงที่ของแรงบิดไฟกระแสตรง

สัญลักษณ์ตัวห้อย

d, q	=	แกน d และ q ในกรอบซิงโครนัส
α, β	=	แกน α และ β ในกรอบนิ่ง
s, r	=	สเตเตอร์ และ โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

opt = ที่เหมาะสม
 max = สูงสุด

สัญลักษณ์ตัวยก

\wedge = ค่าประมาณ
 \sim = ค่าที่ทำนาย
 $*$ = ค่าที่ต้องการ (อ้างอิง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การนำพลังงานลมมาใช้ได้มีมาเป็นเวลานานแล้ว โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อการชลประทาน อย่างไรก็ตามจากการที่น้ำมันเริ่มมีปริมาณที่ลดน้อยลง ทำให้ต้องมีการหาพลังงานชนิดอื่นมาทดแทน เมื่อพิจารณาถึงการนำพลังงานมาผลิตกระแสไฟฟ้าแล้ว พลังงานลมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการทำงานของระบบที่สามารถแข่งขันกับพลังงานจากเชื้อเพลิงแข็ง(Solid fuel)ได้ จากการสำรวจแหล่งกระแสลมทั่วโลก พบว่า 1% ของปริมาณพลังงานลมทั้งหมดมีค่าเทียบเท่ากับพลังงานทั้งหมดที่ได้มาจากเชื้อเพลิงแข็ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้พลังงานลมมีทั้งแบบที่ต่อเข้ากับระบบ และแบบที่แยกตัวอยู่ลำพัง ช่วงของกำลังไฟฟ้าที่ได้มีตั้งแต่ไม่ถึง 1 กิโลวัตต์ สำหรับระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่แยกตัวอยู่ลำพัง จนกระทั่งหลายเมกะวัตต์สำหรับระบบที่มีกังหันลมหลายชุดในการทำงาน โดยกังหันลมจะทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ หรือ ไม่คงที่

ในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการจำลองระบบเพื่อศึกษาถึงการนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้แบ่งการศึกษาการจำลองของระบบออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนควบคุมทางด้าน Front-End Converter และ ส่วนควบคุมทางด้าน Induction Machine ดังจะกล่าวในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ลมและกังหันลม

2.1 ลม

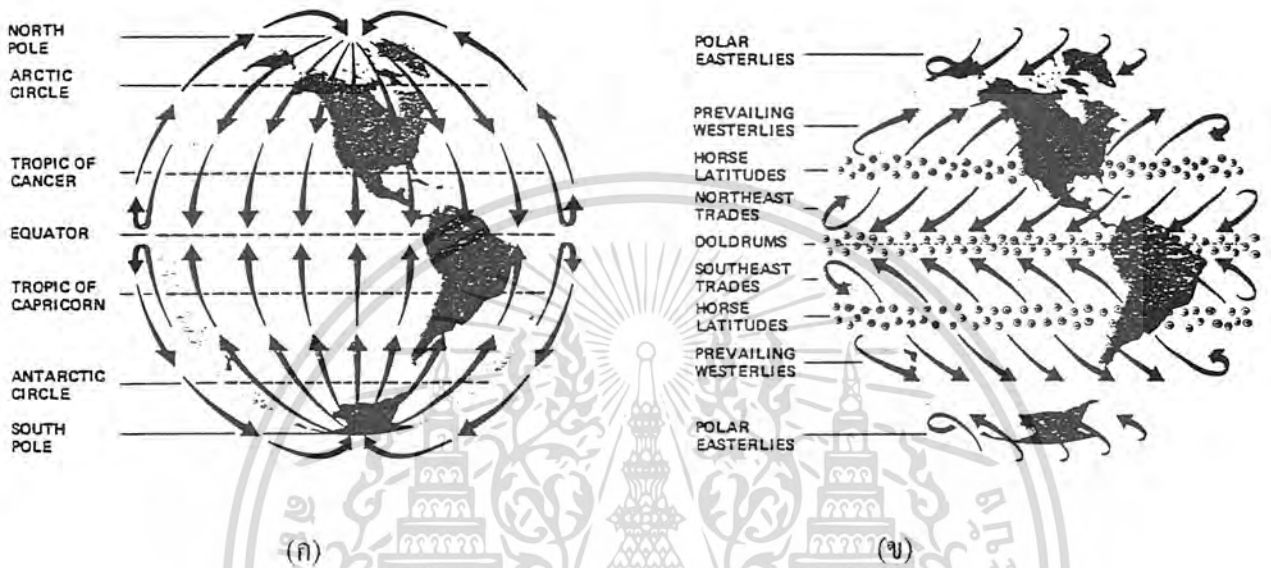
2.1.1 บทนำ

ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานต่าง ๆ ที่สามารถจะนำพลังงานเหล่านี้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นเราจะนำเอาพลังงานต่างๆ มาแปลงเป็นพลังงานกลแล้ว จากนั้นค่อยนำไปแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานดังกล่าวก็อย่างเช่น พลังงานความร้อน(อาจจะได้จากการเผาไหม้ของก๊าซ น้ำมัน ถ่านหิน หรือจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์) พลังงานที่ได้จากการไหลของน้ำ พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ และพลังงานจากลม เป็นต้น สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงการนำพลังงานลมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงพลังงานลม และการคำนวณหาพลังงานจากลมรวมไปถึงการวัดความเร็วลม และทิศทางของลม

2.1.2 ลม

เนื่องจากการที่บรรยากาศพื้นผิวโลกมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศ จึงทำให้ความหนาแน่นของอากาศ หรือความกดอากาศนั้นแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ โดยที่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้อากาศบริเวณนั้นลอยตัวขึ้นสูง เพราะว่บริเวณดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำ(อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะเบากว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ) เป็นเหตุให้อากาศจากบริเวณอื่น ๆ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะมีความกดอากาศสูงกว่านั้นจะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ และการเคลื่อนตัวของอากาศจากที่หนึ่ง ไปยังอีกที่หนึ่งนี้ เรนเรียกว่า “ลม” หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ลม คือการเคลื่อนตัวของอากาศ เราอาจจะแบ่งลักษณะการเกิดของลมอย่างกว้าง ๆ ได้เป็นสองแบบ คือการเกิดในลักษณะทั่วทั้งโลก และการเกิดในลักษณะเฉพาะที่ สำหรับลักษณะแรกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการที่อุณหภูมิของพื้นผิวโลกที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรนั้นสูงกว่าอุณหภูมิที่ขั้วโลกเหนือ และขั้วโลกใต้ เป็นเหตุให้อากาศร้อนที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรนั้นลอยตัวขึ้นสูงสู่บรรยากาศข้างบน ทำให้อากาศที่อยู่ขั้วโลกซึ่งเย็นกว่าเคลื่อนตัวมายังบริเวณเส้นศูนย์สูตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) แต่เนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเอง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศนี้ โดยที่อากาศร้อนซึ่งอยู่ในบรรยากาศชั้นบนจะมีทิศทางค่อนไปทางตะวันออก และอากาศเย็นซึ่งอยู่ใกล้พื้นผิวโลกจะหมุนตัวไปในทางทิศตะวันตกเหมือนแสดงในรูปที่ 2.1(ข) สำหรับลักษณะการเกิดลมแบบที่สอง นั้นสามารถเกิดได้สองแบบคือ เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นดินและพื้นน้ำ และเกิดจากลักษณะความลาดชันของเชิงเขาหรือภูเขา สำหรับแบบแรกในช่วงเวลากลางวันจะมีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นโลกทำให้พื้นดินนั้นดูดซับความร้อนได้มากกว่าพื้นน้ำ ซึ่งจะทำให้อากาศบนพื้นดินมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศบนพื้นน้ำ แล้วอากาศที่พื้นดินจะลอยตัว
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้นและอากาศพื้นน้ำจะเคลื่อนตัวมาแทนที่ และในเวลากลางคืนทิศทางการเคลื่อนที่จะตรงกันข้ามกับช่วงเวลากลางวัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) ในแบบที่สองในช่วงเวลากลางวันอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นไปตามความลาดชันของภูเขา และในเวลากลางคืนอากาศที่เย็นซึ่งหนักจะกดตัวต่ำลงมาตามความลาดชันของภูเขาเหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.2(ข)



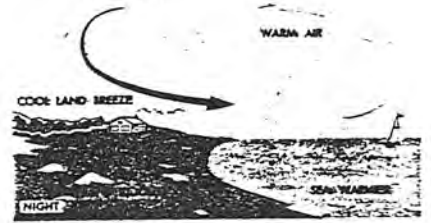
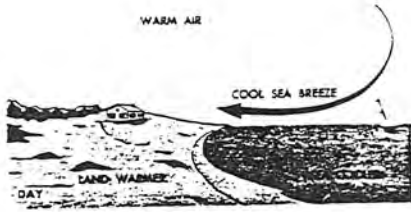
รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดลมทั่วทั้งโลก

(ก) ทิศทางลมเมื่อโลกไม่หมุน

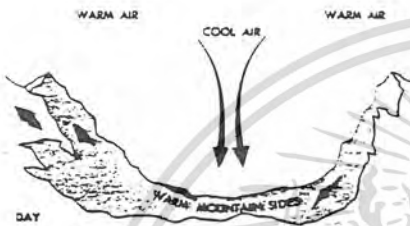
(ข) ทิศทางลมเมื่อมีผลกระทบจากการหมุนของโลก

เมื่อลมเป็นการเคลื่อนที่ของอากาศและอากาศนั้นมีมวล ดังนั้นลมจึงจัดว่าเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งพลังงานจากลมนี้เป็นพลังที่ได้จากธรรมชาติ และเป็นพลังงานที่ไม่ทำให้เกิดมลพิษหรือพลังงานบริสุทธิ์ และพลังงานที่ได้จากลมนี้ยังจัดว่าเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด แต่พลังงานลมก็เป็นพลังงานที่ไม่มีความแน่นอน เพราะว่าลมก็มีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และลมยังมีความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามที่เราสามารถที่จะนำเอาพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์ได้ซึ่งมนุษย์เราได้เอาพลังงานจากลมมาใช้ตั้งแต่อดีตกาล โดยการนำมาใช้ในการเดินเรือในมหาสมุทร หรือวิดน้ำเพื่อการเกษตร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดลมแบบเฉพาะที่

(ก) การเกิดลมตามชายฝั่ง

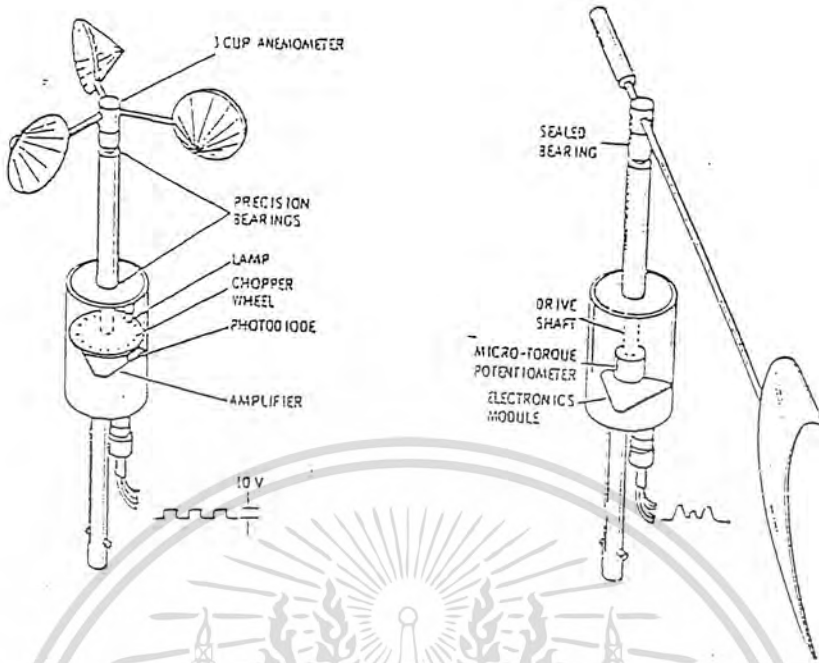
(ข) การเกิดลมตามหุบเขา

2.1.3 เครื่องมือวัดความเร็วลม และเครื่องแสดงทิศทางลม

การวัดทิศทาง และการวัดความเร็วของลมมีความสำคัญมากในการที่จะตรวจสอบสถานที่ที่เหมาะสม สำหรับการติดตั้งเครื่องกลทางลม หรือใช้ตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติของเครื่องกลทางลมที่สัมพันธ์กับความเร็วลม เครื่องมือที่ใช้ในการวัดลมเราเรียกว่า “อะนิโมมิเตอร์” (Anemometer) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเร็วลมแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นจะเป็นแบบถ้วย (แสดงในรูปที่ 1.3(ก)) และเครื่องที่ใช้แสดงทิศทางลมได้แสดงในรูปที่ 1.3(ข)

สำหรับเครื่องมือวัดลมแบบใหม่จะมีความสามารถในการบันทึกค่าได้ เครื่องมือวัดบางแบบอาจจะรวมทั้งเครื่องวัดความเร็วลมและเครื่องแสดงทิศทางลมไว้ด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 (ก) เครื่องวัดความเร็วลม
(ข) เครื่องแสดงทิศทางลม

2.1.4 ข้อมูลความเร็วลม ณ แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต

จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งวัดที่ความสูง 80 เมตรจากระดับน้ำทะเล หรือ 36 เมตรจากพื้นดิน ในระยะเวลาหนึ่งปี คือปี 1996 ดูได้จากภาคผนวก

2.2 กังหันลม

2.2.1 ชนิดของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้กันอยู่ที่มีชื่อเรียกที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากรูปร่างที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกตามลักษณะแกนโรเตอร์ที่ติดตั้งใบพัดว่าหมุนในลักษณะใดเมื่อมีลมพัดผ่าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ กังหันชนิดแนวแกนนอน (Horizontal axis machines) และกังหันชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical axis machines) ลักษณะของลมที่ปะทะกับใบพัด ซึ่งจะทำให้แรงขึ้น 2 แรงคือ

1) แรงลาก (drag force : F_D) เป็นแรงที่มีทิศทางเดียวกันกับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างทิศทางของความเร็วลมกับทิศทางความเร็วการหมุนของกังหัน

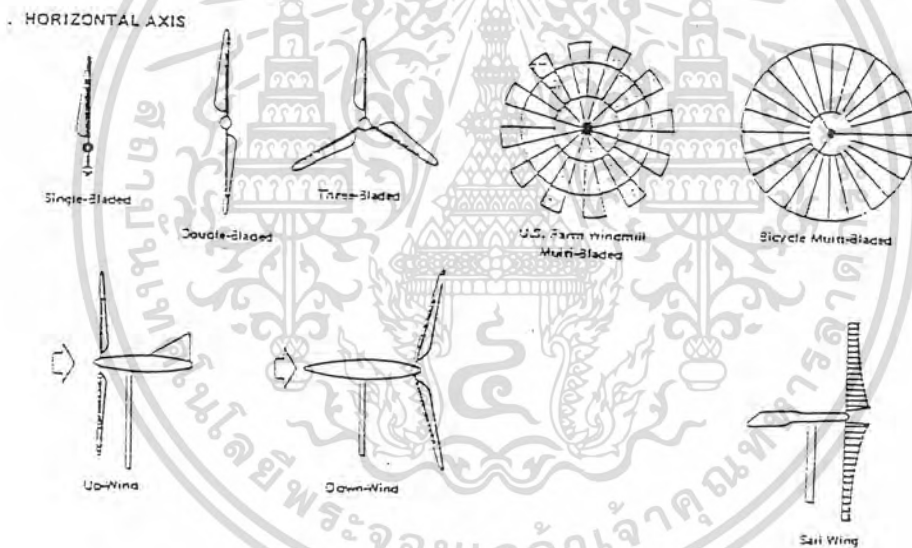
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) แรงยก (lift Force : F_L) เป็นแรงที่มีทิศตั้งฉากกับแนวแรงลาก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแรงยกที่เกิดขึ้นกับปีกของเครื่องบิน

ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้กังหันมีความแตกต่างกัน คือ ความเป็น solidity (solidity เท่ากับ พื้นที่หน้าตัดที่ใบพัดกังหันหมุนต่อพื้นที่ของใบพัดของกังหัน ซึ่งจะบ่งบอกถึงลักษณะการใช้งานด้วย เช่น ถ้าเป็นพวก high solidity machine จะมีแรงบิดคอนออกตัวสูง แต่กำลังสูงสุดจะเกิดที่ความเร็วการหมุนต่ำซึ่งเหมาะที่จะใช้เป็นกังหันน้ำ ส่วนพวก low solidity machine แรงบิดออกตัวต่ำ กำลังเกิดสูงสุดที่ความเร็วการหมุนสูงเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

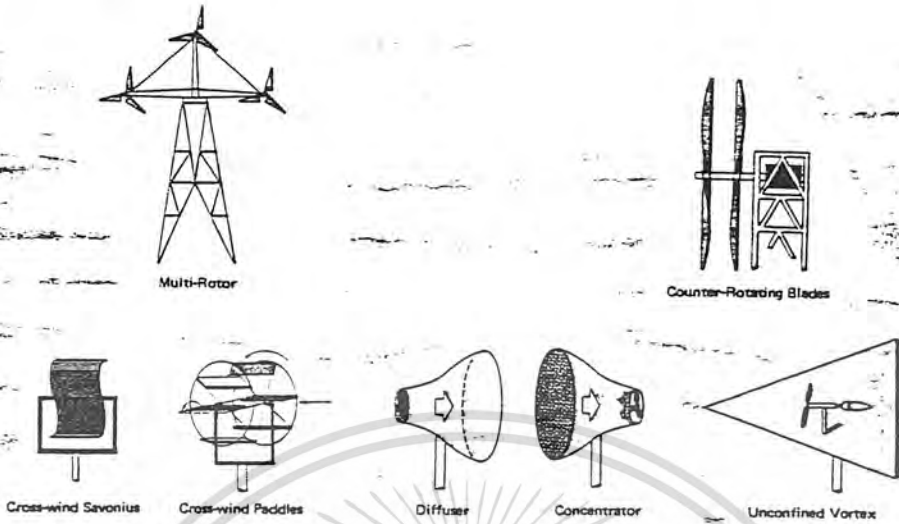
2.2.2 กังหันชนิดแนวแกนนอน (Horizontal axis machines)

กังหันแบบนี้จะมีแนวแกนหมุนอยู่ในแนวนอนตามพื้นผิวโลกและขนานกับทิศทางกระแสลม ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับกังหันน้ำ มีทั้งลักษณะที่ใช้ด้านหน้ากังหันเข้ารับลม (upwind) และใช้ด้านหลังกังหันเข้ารับลม (downwind) และแบบต่างๆ ดังรูป



รูปที่ 2.4 กังหันแนวแกนนอนชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



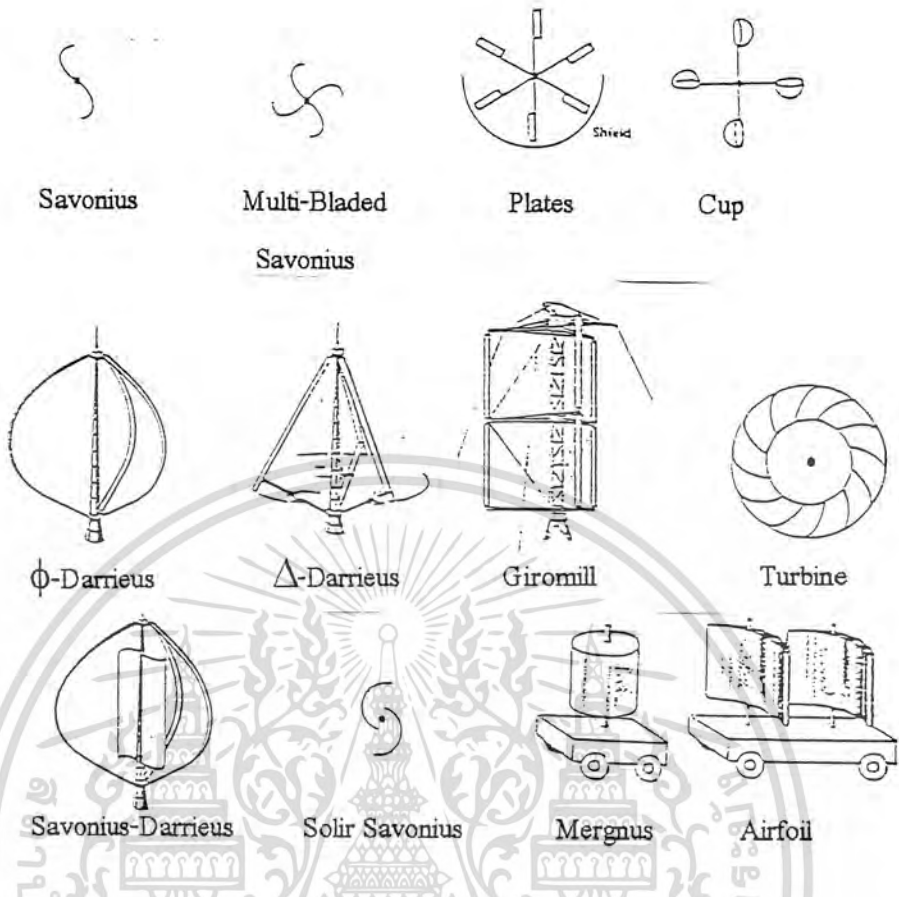
รูปที่ 2.4 กังหันแนวแกนนอนชนิดต่างๆ (ต่อ)

2.2.3 กังหันชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical axis machines)

กังหันแบบนี้จะมีแนวแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลมและระนาบพื้นดิน กังหันนี้จะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าแบบแนวแกนนอน สามารถรับลมได้ทุกทิศทางแต่จะให้กำลังงานที่น้อยกว่าแบบแนวแกนนอนเมื่อเทียบพื้นที่เท่ากัน กังหันแบบนี้จะมีหลายลักษณะหลายรูปแบบ เช่น

- 1) Cup anemometer เป็นกังหันที่อาศัยแรงลากทำให้เกิดการหมุน ซึ่งขนาดของลูกถ้วยก็ขึ้นกับความเร็วลมและความถี่ในการหมุน
- 2) Savonius rotor (turbo rotor) จะอาศัยแรงลมที่เคลื่อนที่ผ่านใบพัดที่มีลักษณะโค้งงอ ทำให้เกิดแรงลากตัวกังหันให้หมุนไป ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก แต่ให้แรงบิดขณะออกตัวมาก
- 3) Darrieus rotor จะประกอบด้วยใบพัดที่มีลักษณะยาวโค้งงอและซี่ใบพัดที่ปลายทั้งสองข้างเข้ากับแกนหมุน แรงที่ใช้ขับจะเป็นแรงยก แรงบิดสูงสุดจะเกิดที่ความเร็วลมสูงสุดแต่แรงบิดขณะออกตัวน้อยจะต้องอาศัยแรงบิดจากภายนอกช่วยขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กังหันแนวแกนตั้งชนิดต่างๆ

2.2.4 กังหันลมในประเทศไทย

กังหันที่มีใช้ในประเทศไทยส่วนมากจะเป็นกังหันแบบแนวแกนนอน ซึ่งจะใช้ในการเกษตรกรรม โดยใช้ในการสูบน้ำหรือวิดน้ำเพื่อใช้ในการทำนาเกลือ เป็นต้น โครงสร้างจะมีแบบที่ทำด้วยไม้และแบบที่ทำด้วยเหล็ก ลักษณะของกังหันแบบใช้ไม้ทำเป็นโครงสร้างจะมีเสาสองต้นเป็นตัวรองรับ มีเชือกขึงคึงระหว่างก้านใบเพื่อความแข็งแรง ส่วนใบนั้นอาจจะใช้ผ้า เสื่อ หรือไม้ไผ่สาน ซึ่งมีตั้งแต่สองใบถึงแปดใบ กังหันแบบนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 4-7 เมตร สำหรับแบบหลายใบนั้นจะทำด้วยเหล็กกว่าในท์ และส่วนประกอบต่างๆจะทำด้วยโลหะ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10-20 ฟุต มีจำนวนใบตั้งแต่ 30-45 ใบ และยังสามารถที่จะหมุนรับทิศทางลมโดยใช้หางเสือบังคับทิศทางเป็นตัวช่วย ซึ่งกังหันแบบนี้จะติดตั้งไว้บนหอสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกังหันแนวแกนตั้งและกังหันแนวแกนนอน

กังหันแนวแกนนอน	กังหันแนวแกนตั้ง
<u>ข้อดี</u>	<u>ข้อดี</u>
<ol style="list-style-type: none"> 1. มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อน้ำหนักเท่ากัน 2. ประสิทธิภาพสูงกว่า 3. แรงบิดรอบแกนสูง 4. ความเร็วรอบสูงกว่าเมื่อความเร็วลมเท่ากัน 5. ความเร็วรอบคงที่กว่า 	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับลมได้ทุกทิศทาง ไม่ต้องใช้หางเสือในการปรับทิศทาง 2. น้ำหนักที่ลงที่ฐานมีความสมดุลมากกว่า 3. เริ่มต้นหมุนเองได้เมื่อความเร็วลมต่ำ 4. ระบบการผลิตส่งกำลังทำได้ง่าย ราคาถูก

กังหันแนวแกนนอน	กังหันแนวแกนตั้ง
<u>ข้อเสีย</u>	<u>ข้อเสีย</u>
<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องปรับทิศทางของใบกังหันเข้าหาทิศทางลม 2. การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับแกนหมุนจะทำได้ยาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีแรงต้านการหมุนจากใบพัดที่ไม่ได้รับลม 2. ไม่สามารถรับลมได้ทุกใบ

2.3 พลังงานลม

ในการคำนวณพลังงานที่ได้จากลม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) สัมประสิทธิ์แรงบิด (torque coefficient) และ tip speed ratio (λ) การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาในกรณีที่เป็นแบบ โมเมนตัมเชิงเส้น (Linear Momentum)

2.3.1 กำลังงาน

กำหนดให้การไหลของลมในช่วงต้นลมที่ไหลผ่านท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของใบพัดกังหันลม (A_f) จะได้พลังงานจลน์ที่ไหลผ่านต่อเวลาเป็น

$$P_0 = \frac{1}{2} (\rho A_f u_0) u_0^2 \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ

u_0 คือความเร็วของลมที่มีแนวการพัดอย่างสม่ำเสมอเป็นเส้นตรง

ρ เป็นฟังก์ชันของความสูงและสภาพภูมิอากาศ ความเร็วลมก็ขึ้นอยู่กับความสูง ซึ่งก็จะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่และเวลาที่ต่างกันด้วย กำหนดให้ ρ และ u_0 มีค่าคงที่ตลอดเวลาและพื้นที่ที่กำหนด โดยจะกำหนดให้ลมที่พิจารณานี้เป็นของเหลวไม่อัดตัว (incompressible fluid)

จากวิธีการข้างต้นเป็นการพิจารณาแบบที่ความเร็วลมมีแนวการไหลที่คงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาที่ผ่านกังหัน แต่ที่จริงแล้วความเร็วลม พื้นที่และความดันก่อนผ่านและหลังผ่านกังหันจะไม่เท่ากัน ถ้ากำหนดให้ A_1 เป็นพื้นที่ใบพัดกังหันหมุนกวาด A_0 เป็นพื้นที่หน้าตัดของความเร็วต้นลมก่อนผ่านกังหัน และ A_2 เป็นพื้นที่หน้าตัดของความเร็วหลังผ่านกังหัน



รูปที่ 2.6 การขยายตัวของกระแสในรูปแบบของ Benz

แรงที่เกิดบนกังหันเท่ากับ โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยของเวลา ถ้ามวลอากาศมีอัตราการไหลต่อเวลาเท่ากับ m'

$$F = m' u_0 - m' u_2 \quad (2.2)$$

ดังนั้นกำลังที่ได้จากกังหัน เมื่อความเร็วลมขณะผ่านใบพัดกังหันเท่ากับ u_1 คือ

$$P_M = F u_1 = (m' u_0 - m' u_2) u_1 \quad (2.3)$$

พลังงานที่สูญหายไปเมื่อลมพัดผ่านกังหัน คือ

$$P_W = \frac{1}{2} m' (u_0^2 - u_2^2) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ จะได้

$$(u_0 - u_2)u_1 = \frac{1}{2}(u_0^2 - u_2^2) = \frac{1}{2}(u_0 - u_2)(u_0 + u_2)$$

$$u_1 = \frac{(u_0 + u_2)}{2} \quad (2.5)$$

ตามทฤษฎีของโมเมนตัมเชิงเส้น ความเร็วลมที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของกังหันจะมากกว่าครึ่งหนึ่งของความเร็วลมที่มีแนวการไหลลงที่สม่ำเสมอที่ผ่านกังหัน โดยมวลอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดกังหันหาได้จาก

$$m' = \rho A_1 u_1$$

$$P_M = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_2) \quad (2.6)$$

$$P_M = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - (2u_1 - u_0)) = 2\rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_1)$$

กำหนดให้ *interference factor* (a) เป็นอัตราส่วนของความเร็วลมลดลงต่อความเร็วลมที่กังหัน ดังนั้น

$$a = \frac{(u_0 - u_1)}{u_0} = \frac{(u_0 - u_2)}{2u_2}$$

$$P_M = 2\rho A_1 (1-a)^2 u_0^2 [u_0 - (1-a)u_0] \quad (2.7)$$

$$P_M = \rho A_1 u_0^3 \left[\frac{4a(1-a^2)}{2} \right]$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการก่อนหน้านี้ จะได้

$$P_M = C_P P_0$$

$$P_M = \frac{1}{2} \rho C_P A_1 u_0^3 \quad (2.8)$$

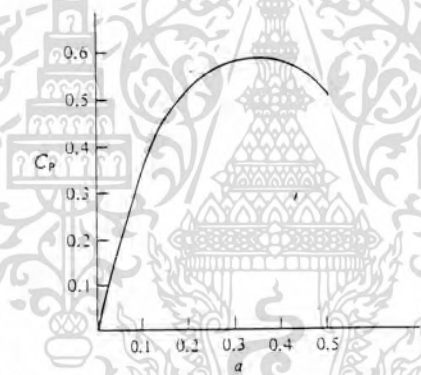
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_0 = เป็นพลังงานที่ได้จากลมที่มีแนวการไหลที่สม่ำเสมอ และ C_p = เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้น หรือเรียกอีกอย่างว่า power coefficient

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ a มีค่าเท่ากับ $1/3$ ค่า C_p จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $16/27 = 0.59$ จะเห็นได้ว่าสามารถดึงพลังงานออกมาได้เพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้นเนื่องจากว่าอากาศจะเกิดพลังงานจนหลังจากที่ไหลผ่านกังหัน โดยค่าสูงสุดของพลังงานที่สามารถนำออกมาใช้ได้ ($C_p = 16/27$) จะเรียกว่า *Betz criterion* ซึ่งยังใช้กับกังหันที่ใช้แรงจากการไหลของน้ำเป็นตัวขับเคลื่อนได้ด้วย เช่น แรงที่ได้จากน้ำขึ้นน้ำลงหรือแรงที่มาจากกรไหลของน้ำในแม่น้ำ

สัมประสิทธิ์พลังงาน (power coefficient : C_p) เป็นประสิทธิภาพในการดึงเอาพลังงานที่มาจากกังหันมวลของอากาศไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดใบพัดของกังหันออกมาใช้



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของ C_p ในฟังก์ชันของ *interference factor* a เมื่อ $C_p = 4a(1-a)^2$

2.3.2 แรงบิด

แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำปลายใบพัดยาว R เมตรของกังหัน

$$T_{\max} = F_{\max} R$$

$$F_{\max} = \frac{\rho A_1 u_0^2}{2}$$

(2.10)

$$T_{\max} = \frac{\rho A_1 u_0^2 R}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเครื่องจักรได้ให้ แรงบิดที่เพลาเท่ากับ T สัมประสิทธิ์แรงบิด (torque coefficient : C_T) จะกำหนด โดย

$$T = C_T T_{\max} \quad (2.11)$$

กำหนดให้ *tip speed ratio* λ เป็นอัตราส่วนระหว่าง ความเร็วปลายใบพัดของบนอกต่อความเร็ว u_0

$$\lambda = \frac{v_t}{u_0} = \frac{R\omega}{u_0} \quad (2.12)$$

$$T_{\max} = \frac{\rho A_1 u_0^2 (u_0 \lambda)}{2\omega} = \frac{P_0 \lambda}{\omega}$$

P_0 คือพลังงานลมในสมการข้างต้น และ P_M เป็นพลังงานทางกลที่ได้จากกังหัน ดังนั้น

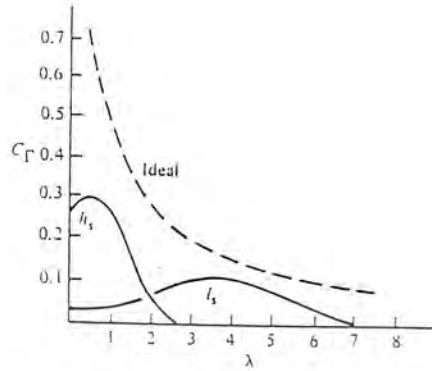
$$\begin{aligned} P_M &= T\omega \\ P_M &= C_P P_0 \\ P_M &= C_T T_{\max} \omega \\ C_P P_0 &= C_T P_0 \lambda \\ C_P P_0 &= C_T \lambda \end{aligned} \quad (2.13)$$

จะสังเกตเห็นว่า C_P และ C_T ต่างก็เป็นฟังก์ชันของ *tip speed ratio* (λ) และค่าไม่คงที่ด้วย ตาม Benz criterion จะพบว่าค่าสูงสุดของ C_P เท่ากับ 0.59 ดังนั้น

$$C_{T_{\max}} = \frac{0.59}{\lambda} \quad (2.14)$$

ดังรูปข้างล่างแสดงถึงลักษณะของกังหันที่ใช้งาน. กังหันที่ high solidity จะมีค่า *tip speed ratio* ต่ำ แต่แรงบิดออกตัวสูง ตรงกันข้ามกับกังหันที่ low solidity (เช่นกังหันที่มีใบพัดขนาดเล็ก 2 ใบ)จะมีค่า *tip speed ratio* สูงแต่แรงบิดออกตัวต่ำและต้องใช้แรงบิดจากภายนอก ตำแหน่งที่มีค่า *tip speed ratio* สูง จะเกิดการหมุนอย่างอิสระ (freewheel) เนื่องจากแรงบิดจะลดลงเป็นศูนย์ ดังนั้นกังหันที่มีความเร็วรอบสูงที่ความเร็วลมมากอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับแกนหมุน และค่าแรงบิดกับกำลังไม่จำเป็นต้องเท่ากันที่ λ เดียวกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Torque coefficient (C_T) กับ tip speed ratio (λ) ของกังหันแบบ high solidity , low solidity และ ideal criterion

2.3.3 Tip speed ratio

อุปกรณ์กังหันลมจะต้องติดตั้งในที่ๆมีปริมาณที่มากเพียงพอที่จะให้พลังงานที่มากที่สุดตาม Benz criterion ที่ได้กำหนดไว้ที่ 59% โดยสาเหตุที่มีผลทำให้พลังงานที่ได้ลดลงจากจุด optimum คือถ้า

1) ใบพัดอยู่ชิดกันมากเกินไปหรือกังหันหมุนเร็วเกินไป จะมีผลให้ลมที่ผ่านใบพัดอันหน้าไปรบกวนใบพัดที่ตามมา หรือ

2) ใบพัดอยู่ห่างกันเกินไปหรือหมุนช้าเกินไป จะทำให้ใบพัดไม่ทันที่จะได้รับแรงจากลมที่พัดเข้ามา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่จะต้องกำหนดความถี่ในการหมุนให้สอดคล้องกับความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมี t_b (เวลาที่ใบพัดใบถัดมาจะเข้าแทนตำแหน่งใบพัดใบก่อนหน้า) และ t_w (เวลาที่กระแสลมเพิ่มขึ้นเนื่องจากปะทะกับใบพัดจนกลับสู่สภาวะปกติ) โดย t_w จะแปรผันตรงกับขนาดและรูปร่างของใบพัดและแปรผกผันกับความเร็วลม

กำหนดให้กังหันมีใบพัด n ใบพัด มีความเร็วลมพัดเข้า u_0 หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม Ω และ d เป็นระยะทางระหว่างช่วงที่การบิดเบี้ยวของกระแสลมที่เข้าและออกจากใบพัด

$$t_b = \frac{2\pi}{n\Omega}$$

$$t_w = \frac{d}{u_0}$$

(2.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังที่ได้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $t_c \approx t_w$ ซึ่งจะคิดที่จุดปลายใบพัดเพราะเป็นจุดที่พื้นที่หน้าตัดการหมุนมีค่ามากที่สุด

$$\frac{2\pi}{d} = \frac{n\Omega}{u_0} \quad (2.16)$$

ถ้าคูณทั้งสองข้างด้วย R (รัศมีใบพัด) จะได้ tip speed ratio (λ)

$$\lambda = \frac{R\Omega}{u_0} \quad (2.17)$$

ที่จุดที่ให้กำลังสูงสุด

$$\lambda = \frac{2\pi}{n} \cdot \frac{R}{d} \quad (2.18)$$

ถ้ากำหนดให้ ดังนั้น $d \approx kR$ ($k \approx 1$) tip speed ratio ที่กำลังสูงสุดเท่ากับ

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{kn} \quad (2.19)$$

แต่ในทางปฏิบัติแล้ว จะให้ k มีค่าประมาณ $1/2$ ดังนั้นสำหรับกังหัน n ใบพัด

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{n} \quad (2.20)$$

ในทางการคำนวณจริงแล้วจะมีการเผื่อค่าที่คำนวณจำนวนใบพัดไว้เพิ่มขึ้นอีก 30% นอกจากนี้ ค่า tip speed ratio ยังมีความเกี่ยวข้องกับมุมที่ลมกระทบกับใบพัด ซึ่งโดยส่วนมากจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง และปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่า tip speed ratio เช่น รัศมีใบพัด, ความเร็วลมและความถี่ของแกนโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการ

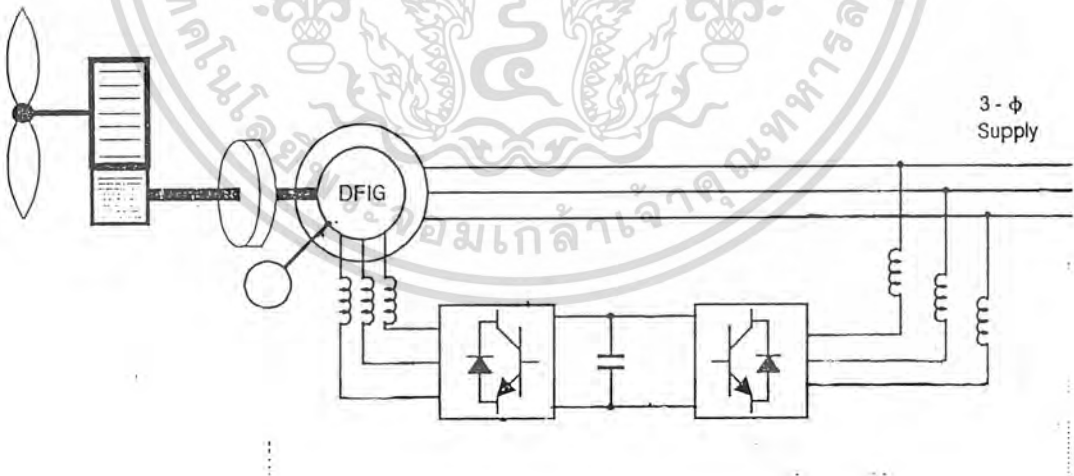
3.1 การควบคุมพลังงานสลิปของเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบววด์โรเตอร์ (Slip Power Controlled Wound Rotor Induction Machine)

การควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำสามารถควบคุมได้ทั้งทางด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์ สำหรับการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบววด์โรเตอร์นั้น จะมีการควบคุมทางด้านโรเตอร์

ส่วนของ พลังงานที่ส่งผ่านแอร์แก๊ป (P_{ag}) ไปยังโรเตอร์ ซึ่งไม่ได้มีการเปลี่ยนมาเป็นพลังงานกล (P_{mech}) เรียกว่า พลังงานสลิป (Slip Power) sP_{ag} วิธีการในการควบคุมพลังงานสลิปให้มีการส่งผ่าน (P_{ag}) ไปยังโรเตอร์เพื่อเปลี่ยนมาเป็นพลังงานกล (P_{mech}) นั้น จะมีวิธีการควบคุมได้ดังนี้

- 1) การควบคุมด้วยการปรับความต้านทานภายนอกของโรเตอร์ (Static โรเตอร์ resistance control)
- 2) การควบคุมด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียส (Static Scherbius drive)
- 3) การควบคุมด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบคราเมอร์ (Static Kramer drive)

วิธีการที่เลือกใช้ในการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบววด์โรเตอร์ ใน Project นี้ ได้มีการเลือกใช่วิธี



รูปที่ 3.1 การควบคุมด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียส (Static Scherbius drive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียส ในการควบคุมด้วยการปรับความต้านทานภายนอกของ โรเตอร์ นั้น จะมีการสูญเสียของพลังงานสลิปอยู่ในวงจรของความต้านทาน ซึ่งวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียส นั้นจะเป็นวิธีการที่ช่วยรักษาพลังงานสลิปเอาไว้ เรียกว่า การคืนพลังงานสลิป (Slip Power Recovery)

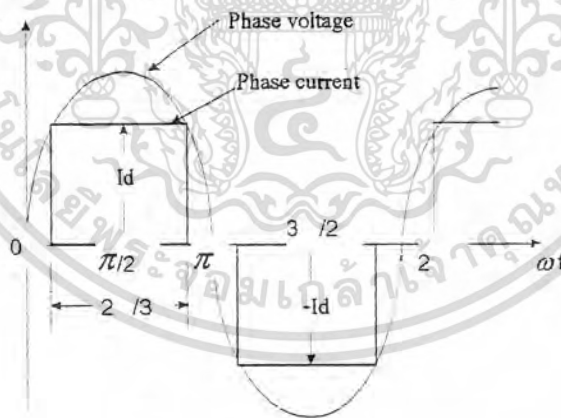
ไดโอดบริดจ์ช่วยในการเปลี่ยนพลังงานสลิปให้อยู่ในรูปของไฟกระแสตรง ซึ่งต่อมาจะถูกเปลี่ยนกลับคืนไปอยู่ในรูปของไฟกระแสสลับ และต้องมีความถี่เท่ากับไฟของระบบ โดยการใส่ 3 เฟส อินเวอร์เตอร์ในการแปลง และจะถูกส่งคืนกลับเข้าไปยังไฟของระบบ โดยการส่งผ่านทางหม้อแปลงเพื่อปรับค่าแรงดันให้เท่ากับไฟของระบบ และมีการใช้ Inductor (L) เป็นตัวกรอง(Filter) ซึ่งใช้ในการขจัดความไม่ต่อเนื่องในการนำไฟฟ้าของตัวนำ ลดไฟกระแสพร้อมของกระแสไฟที่ D.C. Link และ ลดค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจาก Copper loss และจาก เครื่องจักรให้น้อยลง

3.2 การวิเคราะห์การควบคุม ด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียสจะมีเงื่อนไขข้อสมมติในการวิเคราะห์ดังนี้

3.2.1 ไม่มีการเกิด โอเวอร์แล็ปในการคอมมิวเตทที่ ไดโอดบริดจ์ และไม่มี Leakage inductance ที่ เครื่องจักร ซึ่งผลกระทบจากการเกิดโอเวอร์แล็ปคือ เป็นการเพิ่มการ Lag กันของ Induce voltage ที่โรเตอร์ กับกระแส ฟลักคาเมนทอล ของโรเตอร์

3.2.2 กระแสที่ได้จากการกรองที่รีแอคเตอร์ (L filter) จะปราศจากค่า ไฟกระแสพร้อม

3.2.3 ภายใต้เงื่อนไขข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 จะ ได้รูปคลื่นกระแส และ แรงดันของ โรเตอร์ ดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นกระแส และ แรงดันของโรเตอร์

ซึ่งค่ากระแส และแรงดันของโรเตอร์จะอยู่ในเฟสเดียวกัน และรูปคลื่นของกระแส โรเตอร์จะมีรูปคลื่น เหมือนกับรูปคลื่นของกระแสโรเตอร์ที่ได้จาก Current Source Inverter (CSI)

ถ้ามีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นที่กระแส โรเตอร์ ซึ่งฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้มักจะมีการส่งผ่านมาจากสเตเตอร์ และ จะมีความไม่มากนัก ดังนั้น รูปคลื่นของ แรงดันเหนี่ยวนำ และค่าฟลักซ์ สามารถสมมติให้มีรูปคลื่นเป็นไซน์ ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ เมื่อฟลักซ์มีรูปคลื่นเป็นไซน์ ดังนั้นค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะเกิดจากค่า ฟันคานเมนทอล เท่านั้น และตัวของ ฮาโมนิคส์เองจะสร้างแรงบิดที่เป็นพัลส์ขึ้นมา

3.2.4 ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นที่ ไคโอคบริดจ์ และ สวิตช์ที่เป็นสารพวก Semiconductor ไทริสเตอร์

3.2.5 หม้อแปลงที่ใช้จะเป็นแบบอุดมคติคือ ไม่มีการสูญเสีย ไม่มีกระแส Leakage

3.2.6 ไม่มีการเกิดโอเวอร์แล็ปที่ อินเวอร์เตอร์ เช่นเดียวกับที่ ไคโอคบริดจ์

เพาเวอร์ P_{ag} ซึ่งข้ามแอร์เก็บเพื่อจ่ายให้กับโรเตอร์นั้น สามารถแบ่งออกเป็นพลังงานเชิงกล P_{mech} ทางด้านเอาท์พุทและการสูญเสีย P_{loss} ในขดลวดตัวนำของวงจรรโรเตอร์ โดยจะได้รับความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_{loss} = s P_{ag} \quad (3.1)$$

$$P_{mech} = (1-s)P_{ag} \quad (3.2)$$

$$P_{ag} = T \omega s \quad (3.3)$$

โดยที่ T คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เครื่องจักรสร้างขึ้น

ωs คือ ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส

จากสมการเหล่านี้ จะเห็นว่าพลังงานในแอร์เก็บ มีค่าเกือบคงที่เมื่อโหลดที่เครื่องจักรขับเคลื่อนมีค่า คงที่ และนั่นคือ การสูญเสียในขดลวดตัวนำของวงจรรโรเตอร์จะแปรเป็นสัดส่วนตามค่าสลิป การควบคุม ความเร็วของเครื่องจักรชนิดวาค์โรเตอร์โดยการต่อต้านภายนอกเพิ่มเข้าไปนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ที่ความเร็วรอบครึ่งหนึ่งของความเร็วรอบซิงโครนัส พลังงานในแอร์เก็บ จะถูกแบ่ง ออกเป็น พลังงานเอาท์พุทเชิงกลและการสูญเสีย I^2R ในวงจรรโรเตอร์ที่ปริมาณเท่าๆกัน ซึ่งจะทำให้ประ สติภาพรวมต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรวมค่าการสูญเสียในวงจรรโรเตอร์ด้วย โดยทั่วไปที่สลิป พลังงาน เชิงกลจะได้มาจากผลคูณระหว่างพลังงานในแอร์เก็บ P_{ag} และประสิทธิภาพต่อหน่วย $(1-s)$

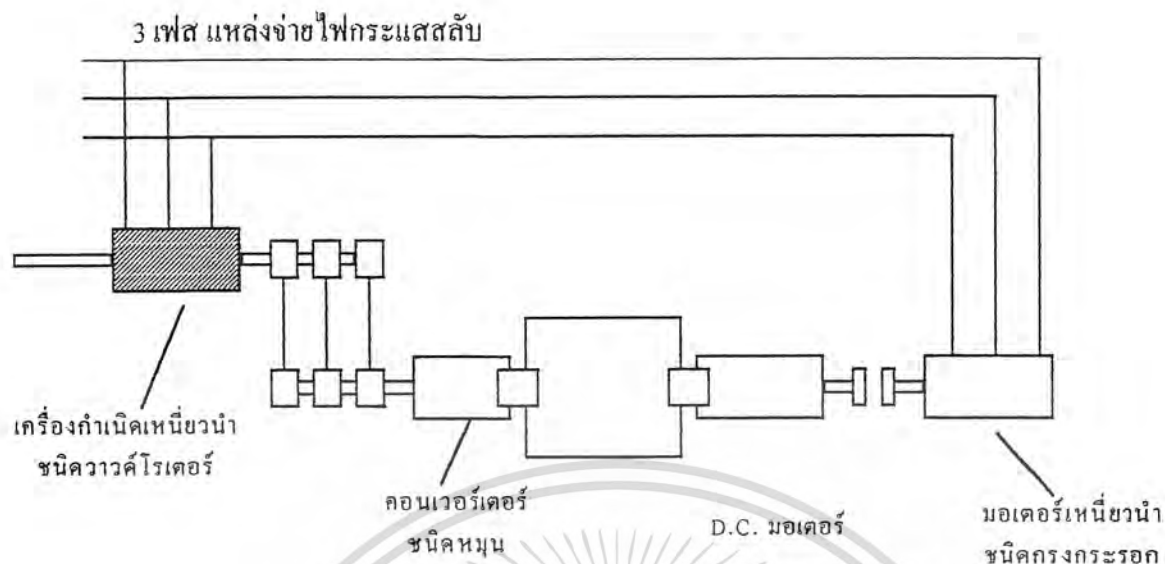
ดังนั้น ประสิทธิภาพรวมของเครื่องจักรจะมีค่าต่ำกว่านี้ที่ความเร็วรอบต่ำๆ พลังงานในแอร์เก็บจะสูญเสีย เกือบหมดสิ้นในวงจรรโรเตอร์ และประสิทธิภาพการทำงานจะต่ำมาก การควบคุมความเร็วรอบโดยการปรับ ค่าความต้านทานในวงจรรโรเตอร์จึงเป็นการที่ไม่ประหยัด นอกจากจะใช้ในการควบคุมความเร็วรอบในช่วง แคบๆซึ่งต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัสเท่านั้น อย่างไรก็ตามก็ไม่จำเป็นที่จะต้องให้พลังงานสลิป sP_{ag} นี้ สูญเสียในความต้านทานเสมอไป เนื่องจากพลังงานส่วนนี้สามารถเอาออกจากรอจรรโรเตอร์เพื่อนำไปใช้ ประโยชน์ต่อไป โดยวิธีนี้จะสามารถทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสูงขึ้น การควบคุมด้วยวิธีการ ขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียสจะมีการต่อต้านลักษณะคาสเคดกับวงจรรโรเตอร์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการ แยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของระบบสูงขึ้น การต่อในลักษณะ คาสเคดกับวงจรโรเตอร์นี้อาจป้อนพลังงานส่วนนี้กลับเข้า แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ หรือนำไปใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรตัวอื่นซึ่ง ต่ออยู่กับเพลาหมุนของเครื่องจักร เห็นขวนานี้ได้

การทำงานในลักษณะของการต่อแบบคาสเคดนี้อาจถือว่าเป็นการควบคุมความเร็วรอบโดยการป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าคืนให้กับวงจรโรเตอร์ก็ได้ สมมติในสภาวะปกติ เครื่องจักรทำงานด้วยค่าสลิป s และให้แรงดันจากภายนอกที่ป้อนเข้าที่สลิปนี้มีเฟสตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรโรเตอร์ ผลการลดลงของกระแสในวงจรโรเตอร์นี้จะทำให้แรงบิดของเครื่องจักรลดลงเนื่องจาก แรงบิดจะแปรเป็นสัดส่วนกับกระแสที่มีเฟสเดียวกับฟลักซ์ โดยสมมติให้ฟลักซ์ในแอร์แก่ปมีค่าคงที่ ดังนั้นเครื่องจักรจะลดความเร็วรอบลงเนื่องจากภาระหนักของโหลด อย่างไรก็ตามในขณะที่สลิปเพิ่มขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสในวงจรโรเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเครื่องจักรจะทำงานในตำแหน่งใหม่ที่มีความเร็วรอบต่ำลง ซึ่งในตำแหน่งนี้แรงบิดของเครื่องจักร จะเท่ากับแรงบิดของโหลดอีกครั้ง

ในกรณีที่ใช้การควบคุมด้วยความต้านทานในวงจรโรเตอร์ แรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายนอกเนื่องจากความถี่สลิปนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของแรงดันที่ป้อนเข้าไปในวงจร แต่ถ้าใช้การป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากภายนอกแทน ก็จะทำให้ผลการทำงานที่เหมือนกันแต่มีข้อดีกว่าที่จะไม่มีการเกิดความร้อนสะสมขึ้นอย่างใด ในการเลือกใช้แหล่งจ่ายที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสมในกรณีนี้นั้นปัญหาที่สำคัญคือ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ป้อนจะต้องเข้ากันพอดีกับความถี่สลิปของโรเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ หลักการคือจะใช้วิธีการเปลี่ยนความถี่ด้วยอุปกรณ์เชิงกล ในคอมมิวเตเตอร์ไฟกระแสสลับ เครื่องจักร การเปลี่ยนความถี่โดยอาศัยการทำงานของคอมมิวเตเตอร์นี้จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการทำให้ความถี่สลิปในโรเตอร์เข้ากับความถี่ของสเตเตอร์ได้พอดีและเพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ในระดับพลังงานสูงๆจะหันมาใช้เครื่องจักรเหนี่ยวนำชนิดที่มีสลิปปรังและจะมีเครื่องจักรอีกชุดหนึ่งซึ่งอยู่ถัดจากวงจร โรเตอร์ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ระบบเซอร์เบียดสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ
ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำชนิดควอเตอร์โรเตอร์

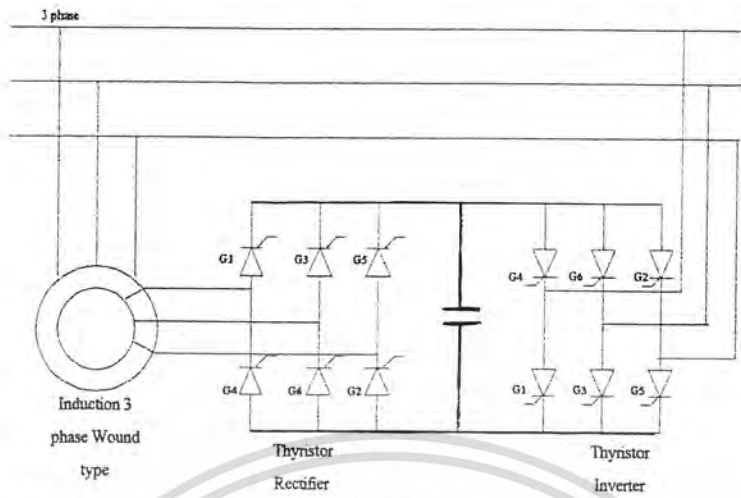
คอนเวอร์เตอร์ชนิดหมุนนี้จะทำหน้าที่เรกติไฟเออร์พลังงานสลิป และเอาต์พุตที่ได้จากการเรกติไฟเออร์นี้จะใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกระแสตรง ซึ่งจะขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกอีกที่ แต่ใน Project นี้จะใช้ Wind turbine ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทน เครื่องจักรกระแสตรง เครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำนี้จะถูกขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วรอบซิงโครนัส เพื่อป้อนพลังงานสลิปเข้าไปยังแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ในระบบคราเมอร์ คอนเวอร์เตอร์ในแบบหมุนนี้จะทำหน้าที่เรกติไฟเออร์พลังงานสลิปเช่นกัน และเอาต์พุตที่ได้จากการเรกติไฟเออร์นี้จะใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกระแสตรง ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องจักรเหนี่ยวนำอีกที ดังนั้นพลังงานสลิปจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานเชิงกลเพื่อช่วยในการขับเคลื่อนเครื่องจักรเหนี่ยวนำอีกแรงหนึ่ง

ต่อมาได้มีการนำอุปกรณ์เปลี่ยนความถี่แบบสแตติกมาใช้ทำหน้าที่แทนชุดเครื่องจักรในระบบเซอร์เบียด ซึ่งจะทำให้ระบบรวมทั้งหมดยกขนาดเล็กลง และมีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น ตลอดจนให้ผลการตอบสนองทางไดนามิกได้ดีขึ้น ในระบบคราเมอร์ก็ได้มีการแก้ไขเพิ่มเติมโดยการใช้ไดโอดบริดจ์ทำหน้าที่แทนคอนเวอร์เตอร์แบบหมุนนี้ และต้องใช้ เครื่องจักรกระแสตรง ในการเปลี่ยนสลิป พลังงานที่ถูกเรกติไฟเออร์แล้วให้อยู่ในรูปเชิงกล ใน Project ได้มีการใช้ Wind Turbine ในการป้อนพลังงานกลเข้าสู่ระบบแทนการใช้ เครื่องจักรกระแสตรง

3.3 ชุดสแตติกคอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำงานในย่านต่ำกว่าความถี่ซิงโครนัส

สำหรับการควบคุมในย่านต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัส ชุดเครื่องจักรทั้งหมดในระบบเซอร์เบียดจะถูกแทนที่ด้วยสแตติกคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.4 เครื่องจักรเหนี่ยวนำ และสแตติกคอนเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟส
 ซึ่งให้ความสำคัญต่ำกว่าความถี่เชิง โครนัส

สแตติกคอนเวอร์เตอร์นี้จะประกอบด้วย 3 เฟสบริดจ์เรกติฟายเออร์ ซึ่งทำงานด้วยความถี่สลิปและจะป้อนพลังงานสลิปที่ถูกเรกติฟายเออร์แล้วนี้ผ่านรีแอคเตอร์(L filter)(ทำให้กระแสเรียบ) ให้กับไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์ และอินเวอร์เตอร์จะคอมมิวเตทในเชิงเฟสโดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งปรากฏที่สลิปริง และบัสบาร์ของขั้วปลายตามลำดับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์นี้อาจถือได้ว่าเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในทิศทางที่หักล้างกับแรงดันโรเตอร์ ที่ถูกเรกติฟายเออร์แล้ว ถ้าไม่คิดการโอเวอร์แล็ปซึ่งเกิดในระหว่างการคอมมิวเตทแล้วจะได้ แรงดันไฟกระแสตรงทางคานเอาท์พุทของ 3 เฟสบริดจ์เรกติฟายเออร์ ในกรณีที่มีมุมไฟร์เป็น 0 ดังนี้

$$V_{do} = 1.35 V_r s \tag{3.4}$$

โดยที่ V_r คือ แรงดันโรเตอร์ระหว่างไลน์ในสภาวะหยุดนิ่ง
 s คือ สลิปที่มีค่าน้อยกว่า 1

สำหรับ 3 เฟสบริดจ์อินเวอร์เตอร์นี้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนเฉลี่ยคือ

$$V_{do} = 1.35 V_L \cos \alpha \tag{3.5}$$

โดยที่ α คือมุมไฟร์ ($\alpha \geq \pi/2$) และ V_L คือ แรงดันระหว่างไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ไม่มีโหลด แรงบิดของเครื่องจักรจะมีค่าน้อยมาก และกระแสโรเตอร์ที่ไหลผ่านวงจรเรกติไฟายเออร์จะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้น แรงดันไฟกระแสตรงทั้งสองในสมการ (3.4) และ (3.5) จะมีค่าทำกัน นั่นคือ

$$1.35 V_r s + 1.35 V_L \cos \alpha = 0$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad s &= -(V_L / V_r) \cos \alpha \\ &= -a \cos \alpha \\ &= a |\cos \alpha| \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่ a คือ จำนวนรอบของขดลวดระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องจักร

ดังนั้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่มีมุมไฟร์ (α) มากกว่า หรือเท่ากับ 90 องศา จะทำให้ได้ค่าสลิปเป็นบวก การปรับค่ามุมไฟร์ (α) จาก 90 องศาถึง 180 องศา ค่าสลิปจะมีการเปลี่ยนค่าจาก 0 จนถึงค่า a และถ้าค่า a เป็น 1 จะทำให้ค่าสลิปมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 1 ดังนั้น การควบคุมความเร็วรอบสามารถทำได้โดยเพียงแต่เปลี่ยนมุมไฟร์ของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น ถ้า $a = 1$ ความเร็วรอบของเครื่องจักรสามารถควบคุมได้จากสถานะที่เกือบจะหยุดนิ่งจนถึงความเร็วรอบเต็มพิกัด

ในการสร้างโหลดแรงบิดนั้นจะต้องมีกระแส I_2 (กระแสไหลในวงจรโรเตอร์) และแรงดันโรเตอร์ ที่ถูกเรกติไฟายเออร์แล้วนี้จะต้องบังคับให้กระแสไหลในทิศทางสวนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่เครื่องจักรเหนี่ยวนำมีการรับโหลด ความเร็วรอบจะลดลงเล็กน้อย และแรงดันซึ่งถูกเรกติไฟายเออร์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและ จะทำให้กระแสโรเตอร์เพิ่มขึ้นในปริมาณที่จำเป็น

ถ้าโรเตอร์มีความต้านทานต่ำ พลังงานสลิป $s P_{ag}$ ของคลื่นพินคาเมนทอลจะมีค่าประมาณเท่ากับ พลังงาน ของ D.C. Link นั่นคือ

$$s P_{ag} = V_d \cdot I_d$$

$$P_{ag} = T \omega s$$

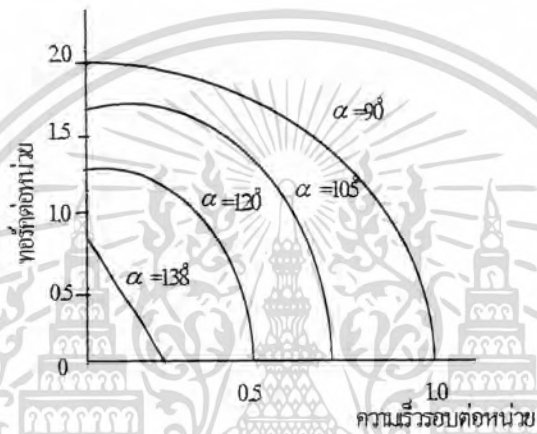
$$T = V_d \cdot I_d / s \omega s$$

ถ้าความเร็วรอบขณะมีโหลดลดลงน้อยมาก ก็สามารถแทนสมการ (5) สำหรับสลิปขณะไม่มีโหลดลงใน สมการแรงบิดข้างต้นนี้ได้ และเมื่อแทนสมการ (4) เพื่อหาค่า V_d ก็จะได้สมการแรงบิด

$$T = 1.35 V_d \cdot I_d / a \omega s \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ แรงบิดในสภาวะปกติของการทำงานจะแปรผันเป็นสัดส่วนกับกระแสโรเตอร์ I_d ที่ถูกเรียกตีฟายเออร์แล้วและกระแสแรงบิดจำนวนนี้จะแปรเป็นสัดส่วนตามผลระหว่างแรงดันโรเตอร์ที่ถูกเรียกตีฟายเออร์แล้วกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จะคงที่สำหรับค่าคงที่ของมุมไฟร์ และนั่นคือ โรเตอร์สลลิปจะเพิ่มตามโหลดแรงบิดในลักษณะเชิงเส้น และจะให้คุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบในลักษณะเดียวกับ เครื่องจักรกระแสตรง ชนิดแยกขดลวดกระแสคืน ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยอาร์เมเจอร์แรงดัน ในทางปฏิบัติคุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบในลักษณะรูปเบ็ดนี้จะมีลักษณะของกราฟ ดังรูป



รูปที่ 3.5 คุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

3.4 เพาเวอร์แฟคเตอร์

สำหรับระบบขับเคลื่อนในย่านความเร็วรอบต่ำกว่าเชิงโครนัส ซึ่งใช้การค่อในลักษณะคาสเคดนี้จะมีข้อเสียเปรียบที่สำคัญคือพินดามนทอลเพาเวอร์แฟคเตอร์จะมีค่าต่ำ ถ้าระบบได้รับการออกแบบให้ความเร็วรอบในย่านควบคุมมีช่วงกว้าง แล้วเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่โหลดเต็มพิกัด และที่ความเร็วรอบสูงสุดจะมีค่าต่ำถึง 0.5 และจะลดถึง 0.3 หรือต่ำกว่านี้ ในขณะที่ความเร็วรอบลดลง เพาเวอร์แฟคเตอร์ที่มีค่าต่ำเช่นนี้ ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากกรีแอกทีฟพลังงานในระหว่างการคอมมิวเตทซึ่งถูกดึงผ่านเครื่องจักรด้วยวงจร 3 เฟสบริดจ์เรียกตีฟายเออร์ จากสเตเตอร์มายังโรเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนเฉลี่ยของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบต่ำสุดที่สามารถควบคุมได้ ในทางอุดมคติภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้มุมไฟร์ในขณะนี้มีค่าเท่ากับ 180 องศา แต่เนื่องจากมุมโอเวอร์แล็ปซึ่งเกิดจากการคอมมิวเตทและช่วงเวลาไทรสเตอร์ต้องใช้ในการกลับคืนสู่สภาวะที่สามารถกั้นกระแสในทิศทางฟอร์เวิร์ดได้นั้นมีค่ามากพอสมควร นั่นคือ มุมไฟร์สูงสุดของอินเวอร์เตอร์จะต้องมีค่าน้อยกว่า 180 องศาเล็กน้อย เพื่อให้ไทรสเตอร์สามารถคอมมิวเตทได้เป็นผลสำเร็จ โดยวิธีนี้จะทำให้กระแสทางด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์มีมูมนำหน้า(Lead) แรงดันในเฟสเดียวกัน และอินเวกซารันเป็นเอกซารันที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดซึ่งสร้างรีแอคทีฟเพาเวอร์ชนิด Lead นั่นคือทำหน้าที่เป็นตัวกำจัดรีแอคทีฟเพาเวอร์ชนิด Lag การกำจัดรีแอคทีฟเพาเวอร์จะมีค่ามากขึ้น เมื่อตำแหน่งมุมไฟร์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงไปอีกเพื่อลดขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนเฉลี่ย และสลิปของเครื่องจักรที่ความเร็วรอบเต็มพิกัด มุมไฟร์ของอินเวอร์เตอร์จะเท่ากับ 90 องศา และอินเวอร์เตอร์จะมีขนาด kVA ที่เป็นรีแอคทีฟเกือบสิ้นเชิง ที่มุมไฟร์ที่กำหนดให้พลังงานสุทธิที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับคือ ผลต่างระหว่างพลังงานที่เครื่องจักรรับเข้าไปกับพลังงานที่ถูกป้อนกลับเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยอินเวอร์เตอร์ แต่อย่างไรก็ตามรีแอคทีฟ kVA รวมก็คือ ผลรวมของรีแอคทีฟพลังงานที่เครื่องจักรและอินเวอร์เตอร์รับเข้าไป ดังนั้นพลังงานแพคเตอร์ของระบบจะลดลงที่ความเร็วรอบต่ำๆ ซึ่งเป็นสถานะที่เครื่องจักรรับรีแอคทีฟเพาเวอร์น้อย

ดังนั้นในระบบที่มีการต่อแบบคาสเคดนี้มักจะใช้ในการควบคุมความเร็วรอบในย่านต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัส เพื่อที่จะทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบมีค่าสูงสุดเท่าที่จะทำได้ มุมไฟร์ของอินเวอร์เตอร์ควรมีค่าต่ำสุดที่ความเร็วรอบต่ำสุดที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นเมื่อต่ออินเวอร์เตอร์โดยตรงกับ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ แรงดันไฟฟ้าของสลิปริงที่สลิปสูงสุด s_{max} ควรมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ โดยประมาณซึ่งสามารถทำได้โดยให้อัตราส่วนการแปลงจากทางด้านสเตเตอร์มายังโรเตอร์: a มีค่าเท่ากับ s_{max} เช่น ถ้าให้ความเร็วรอบควบคุมต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัสลงไปถึงค่าสลิปเท่ากับ 0.6 แล้วจำนวนรอบระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ควรมีค่าเท่ากับ 0.6 ด้วย แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์บางครั้งจะต้องลดลงมาโดยใช้หม้อแปลงลดไฟ หม้อแปลงอินเวอร์เตอร์มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ที่ให้แรงดันขนาดสูงๆ เนื่องจากแรงดันของสลิปริงมีค่าจำกัด และอาจต่ำไปถ้าแปลงเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับโดยตรง อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงจะต้องเลือกให้สัมพันธ์กับจำนวนรอบของเครื่องจักรในลักษณะที่ทำให้เกิดการ ทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้เต็มที่ที่สลิปควบคุมสูงสุด ซึ่งวิธีนี้จะทำให้พลังงานแพคเตอร์ของระบบมีค่าสูงสุดเท่าที่จะทำได้ตลอดย่านความเร็วรอบควบคุม

ในการปรับปรุงค่าพลังงานแพคเตอร์ของระบบขับเคลื่อนแบบคาสเคดนี้ก็ได้มีการคิดแปลงแก้ไขวงจรในรูปแบบต่างๆ ตัวอย่างเช่น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยเฟสก็ได้มีการนำเอาวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดพิเศษมาใช้งานแทน วงจรอินเวอร์เตอร์นี้สามารถทำงานโดยวิธีการคอมมิวเตชันในเชิงเฟสหรือในเชิงบังคับ และสามารถป้อนพลังงานสลิปกลับเข้า แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ได้โดยไม่ต้องรีแอคทีฟเพาเวอร์ในปริมาณสูง การกำจัดรีแอคทีฟพลังงานให้น้อยลงนี้ก็ยังสามารถทำได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์บริดจ์ชนิดกึ่งควบคุมซึ่งใช้ไทรสเตอร์ 3 ตัว โดยให้ไทรสเตอร์ 3 ตัว ทำงานได้อย่างเต็มที่จากการทำงานในลักษณะของเรกติฟายเออร์จนถึงอินเวอร์เตอร์ การเปลี่ยนแท็บในขดลวดของเครื่องจักรก็เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ตลอดจนการลดขนาดพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อนแบบคาสเคดซึ่งมีโพลเป็นชนิดโพลคู่ ข้อได้เปรียบในลักษณะเดียวกันนี้ยังอาจได้จากการใช้ระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

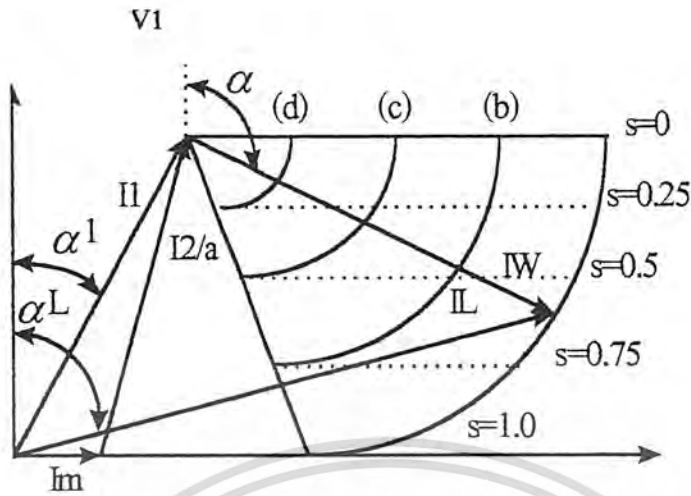
ตัดต่อโดยที่สลิปริงจะถูกสวิตช์เข้ากับหม้อแปลงลดไฟและไดโอดเรกติฟายเออร์ในย่านความเร็วรอบต่ำ การต่อคาปาซิเตอร์เข้าไปเพื่อให้ทำหน้าที่ชดเชย ซึ่งก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้ดีขึ้นตลอดจนเป็นการเพิ่มแรงบิดที่ความเร็วรอบต่ำให้มีค่าสูงขึ้นได้

3.5 การทำงานในย่านจำกัดที่ต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัส

ในระบบขับเคลื่อนแบบคาสเคดซึ่งใช้ควบคุมความเร็วรอบจากสภาวะอยู่จนถึงความเร็วรอบเต็มพิกัดนั้น สมมติคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีขนาด kVA พิกัดเดียวกับของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ (Wound โรเตอร์) อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วรอบซึ่งต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัสถูกจำกัดย่านควบคุมไว้ที่พิกัดของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งจะลดลงอย่างเป็นสัดส่วน และเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบจะดีขึ้น มอเตอร์เหนี่ยวนำนี้จะถูกเร่งความเร็วรอบจากสภาวะหยุดนิ่งด้วยความต้านทานที่ต่อในวงจรโรเตอร์เพื่อการสตาร์ทในลักษณะปกติ ที่ความเร็วรอบต่ำสุดของย่านควบคุมขึ้นกับคอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดจะสวิตช์ต่อเข้ากับวงจรโรเตอร์โดยชุดตรวจจับความเร็วรอบในขณะที่ความต้านทานในการสตาร์ทถูกปลดออก

อุปกรณ์ 3 เฟสบริดจ์เรกติฟายเออร์จะมีแรงดันพิกัดค่าหนึ่งซึ่งกำหนดด้วยสลิปสูงสุดของเครื่องจักร ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันสูงสุดของโรเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสลิป พิกัดกระแสของบริดจ์เรกติฟายเออร์นี้จะถูกกำหนดด้วยค่ากระแสสูงสุดในวงจรโรเตอร์ซึ่งตรงกับตำแหน่งเอาท์พุทแรงบิดสูงสุดในกรณีของโหลดซึ่งแรงบิดคงที่นั่นกระแสโรเตอร์ I_2 และพลังงาน P_{ag} ในแอร์แก๊ปจะมีค่าคงที่ แรงดันสูงสุดในโรเตอร์จะเกิดที่ค่าสลิปสูงสุด s_{max} ที่สามารถควบคุมได้ (เมื่อไม่คำนึงถึงค่าสูญเสียในโรเตอร์) คอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดถ่ายเทพลังงานสลิป sP_{ag} จากโรเตอร์เข้าไปในแหล่งจ่ายไฟฟ้า กรณีของโหลดชนิดไบพัดหมุนนั้นแรงบิดจะแปรผันตามกำลังสองของความเร็วรอบและนั่นคือ กระแสโรเตอร์จะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบเต็มพิกัด อย่างไรก็ตามแรงดันที่สลิปริงจะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบต่ำสุดที่สามารถควบคุมได้ แต่จะต้องกำหนดพิกัดของเรกติฟายเออร์บริดจ์ที่ค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้า แม้แรงดันและกระแสจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกันก็ตาม

อินเวอร์เตอร์บริดจ์จะถูกกำหนดพิกัดไว้ที่ค่ากระแสและแรงดันของ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ซึ่งตรงกับตำแหน่งเอาท์พุทแรงบิดสูงสุดของเครื่องจักร ในกรณีที่ต้องการทำให้เรกติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์มีพิกัดต่ำสุดนั้นจะต้องออกแบบเครื่องจักรให้มีอัตราส่วนในการแปลงในลักษณะที่ความเร็วรอบต่ำสุดที่สามารถควบคุมได้นี้อยู่ตรงกับตำแหน่งการทำงานในลักษณะของอินเวอร์เตอร์ได้อย่างเต็มที่ การทำเช่นนี้เพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ได้ของระบบยังจะมีค่าที่ดีที่สุดอีกด้วย หม้อแปลงอินเวอร์เตอร์ซึ่งต้องใช้ในวงจรคาสเคดของเครื่องจักรที่มีแรงดันสูงๆ จะถูกกำหนดพิกัดไว้เท่ากับพิกัด kVA ของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น เมื่อความเร็วรอบซึ่งต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัสถูกจำกัดย่านการทำงานไว้ พลังงานแฟคเตอร์ของระบบขับเคลื่อนแบบคาสเคดจะดีขึ้นดังจะเห็นได้ จากรูปประกอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ทางเดินของจุดของกระแสขั้วพลาสมากรณีแรงบิดคงที่

- จาก 0 ถึง 100% ของความเร็วรอบพิกัด
- จาก 25 ถึง 100% ของความเร็วรอบพิกัด
- จาก 50 ถึง 100% ของความเร็วรอบพิกัด
- จาก 75 ถึง 100% ของความเร็วรอบพิกัด

ซึ่งเป็นเฟเซอร์ไดอะแกรมโดยประมาณสำหรับกรณีของการโหลดเครื่องจักรด้วยแรงบิดคงที่ กระแสฮาร์โมนิกจะไม่นำมาพิจารณาด้วย และเฟเซอร์ของกระแสที่แสดงในรูปคือ องค์ประกอบพินดามันทอดที่ไม่เป็นชานซ์

กระแสพินดามันทอด I_1 ของสเตเตอร์จะได้จากการรวมองค์ประกอบกระแสแม่เหล็ก I_m และกระแสโหลด $I_{2/a}$ ดังรูปข้างต้น กระแสสเตเตอร์จะมีมุมตามเฟสแรงดัน V_1 ด้วยมุม α_1 และปลายของเฟเซอร์ I_1 จะอยู่ในผัวงกลมซึ่งได้จากการทดสอบเครื่องจักรในขณะที่ลัดวงจรที่โรเตอร์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไดโอดบริดจ์เรกติฟายเออร์ในวงจรโรเตอร์ทำหน้าที่ดึงรีแอคทีฟเฟเซอร์ระหว่างการคอมมิวเตทไว้ องค์ประกอบพินดามันทอดของกระแสอินเวอร์เตอร์ I_{inv} จะ Lag แหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดัน V_1 ด้วยมุมไฟร์ α ถ้าถือว่ามุมโอเวอร์แล็ปจากการคอมมิวเตทเป็น 0 ผลรวมระหว่างเฟเซอร์ I_1 และ I_{inv} คือ กระแสลาชานซ์ ทั้งหมดซึ่งมีมุมเฟสเท่ากับ α_L

ในรูปได้สมมติโหลดคงที่ ฉะนั้นกระแสโรเตอร์ I_2 และกระแสสเตเตอร์ I_1 จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก มุมไฟร์ของอินเวอร์เตอร์สมมติให้มีมุมเท่ากับ 165 องศา ที่ความเร็วต่ำสุดที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจะยังมีมุมเหลืออีก 15 องศา เพื่อใช้ในการคอมมิวเตทไทรสเทออร์ได้อย่างพอเพียง สำหรับการควบคุมความเร็วรอบให้ต่ำจนถึงความเร็วรอบหยุดนิ่งนั้น ทางเดินของจุดกระแสที่ความเร็วรอบเครื่องจักรเริ่มหมุน พลังงานสลิปซึ่งถูกป้อนกลับเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับอินพุททางด้านสเตเตอร์ อนุ ถ้าหากไม่คำนึงถึงค่าการสูญเสีย ค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ ในขณะที่กระแสไลน์รวม จะมีเฟสตาม แหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันอยู่ 90 องศาที่ค่าสลิปเท่ากับ 0.5 พลังงานสลิปจะเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่สเตเตอร์ และองค์ประกอบของ I_{inv} ในส่วนที่ให้กำลังงานจะเป็นครึ่งหนึ่งขององค์ประกอบในส่วนที่ให้กำลังงานของ I_L ซึ่งจะเห็นได้ว่ารีแอกทีฟเพาเวอร์ที่สูญหายไปนี้จะน้อยลงในขณะที่ย่านความเร็วรอบถูกจำกัดให้แคบลง

ดังนั้นเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบจะดีขึ้นอย่างมากและราคาของชุดคอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดจะต่ำลงเมื่อรอบหมุนซึ่งต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัสถูกจำกัดย่านควบคุมไว้ ในลักษณะนี้พิกัดของคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าน้อยกว่าพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบควบคุมเครื่องจักรกระแสตรง ซึ่งควบคุมการทำงานที่อาร์มเจอร์มากในขนาดกำลังม้าเดียวกัน ในระบบขับเคลื่อนด้วยไฟกระแสดร่งนั้นชุดคอนเวอร์เตอร์จะมีพิกัดที่ค่าแรงดัน และกระแสแอมเพอร์สูงสุดตรงกับตำแหน่งการทำงานที่โหลดเต็มพิกัด และที่ความเร็วรอบสูงสุด ในระบบขับเคลื่อนแบบคาสเคดซึ่งมีความเร็วรอบในย่านควบคุมจาก 70 ถึง 100 เอร์เซ็นต์ของความเร็วยุโรปเต็มพิกัดนั้นขนาด kVA พิกัดของคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเพียง 30 เอร์เซ็นต์ของพิกัดของเครื่องจักร ดังนั้นระบบซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรเหนี่ยวนำและสเตตติคคอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดนี้เหมาะสำหรับงานขับเคลื่อนซึ่งต้องการความเร็วรอบในย่านที่ต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัส ตัวอย่างเช่นงานขับเคลื่อนปั๊มปี และใบพัดซึ่งพลังงานเอาท์พุทจะแปรผันตามกำลังสามของความเร็วรอบ ดังนั้นการทำงานในย่านความเร็วรอบซึ่งถูกจำกัดไว้ให้ต่ำกว่าความเร็วรอบซิงโครนัสนั้นจึงนับว่าเป็นการเพียงพอ

3.6 อิทธิพลของฮาโมนิกส์

สำหรับการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดนี้ พลังงานสลิปจะถูกเรียกคืนไฟเออร์ในขั้นตอนแรก จากนั้นจึงผ่านวงจรฟิลเตอร์ และนำไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกที ในขั้นตอนของการเรียกคืนไฟเออร์นี้จะทำให้กระแสในโรเตอร์ที่ได้ไม่เป็นไซน์และกระแสดังกล่าวนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสที่ไม่เป็นไซน์ขึ้นในขดลวดสเตเตอร์ด้วย กระแสฮาโมนิกส์เหล่านี้จะทำให้เกิดแรงบิดและการสูญเสียเนื่องจากฮาโมนิกส์เพิ่มขึ้นอีกส่วน ซึ่งมีผลให้เครื่องจักรทำงานต่ำกว่าพิกัดเดิม เมื่อไม่มีฮาโมนิกส์ แรงบิดของฮาโมนิกส์ที่ไม่ซิงโครนัสนี้จะเกิดจากปฏิกิริยา โต้ตอบกันระหว่างโรเตอร์ฟลักซ์ของฮาโมนิกส์ในรูปเวลาและกระแสในขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของฟลักซ์เดียวกันนี้ โดยปกติแล้วแรงบิดที่ไม่ซิงโครนัสจะมีขนาดเล็กน้อยเท่านั้น ฟลักซ์ของฮาโมนิกส์ในรูประยะห่างนี้จะมีน้อยมากสำหรับเครื่องจักรที่ได้รับการออกแบบอย่างดี

การใช้รีแอกเตอร์ (L filter) ใน D.C. Link เพื่อจกกระแสให้เรียบนั้น นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ดี และจะต้องใช้อินดักแตนซ์ขนาดใหญ่เพื่อจำกัดการไหลของกระแสฮาโมนิกส์ในขดลวดของโรเตอร์ กระแสฮาโมนิกส์ในสเตเตอร์ และโรเตอร์จะก่อให้เกิดการสูญเสียของฮาโมนิกส์ในลวดตัวนำขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรต่ำลง เพื่อที่จำกัดการสูญเสียของฮาโมนิกส์เหล่านี้ให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าตามที่กำหนดไว้โดยอยู่ในรูปการสูญเสียเครื่องจักรนั้น อินคัมแคนซ์ของฟิเตอร์นี้มีค่ามากขึ้นเมื่อ กระแสพิกัดของ D.C. Link ของระบบมีค่าน้อยลง ค่าการสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์จะต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน เมื่อต้องการคำนวณประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งหมดในทางปฏิบัติการสูญเสียภายในคอนเวอร์เตอร์แบบคลาสเซคซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$P_{conv} \approx (0.046 \text{ to } 0.08) s_{\max} P_{ag} \quad (3.8)$$

การสูญเสียอันเนื่องมาจากฮาโมนิคส์นี้จะทำให้เครื่องจักรเหนี่ยวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้พิกัดของเครื่องจักรต่ำลง รีแอกทีฟเพาเวอร์ซึ่งเกิดจากการคอมมิวเตท และถูกดึงผ่านเครื่องจักรโดยวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์นี้จะทำให้พลังงานใช้งานของเครื่องจักรมีพิกัดต่ำลง

3.7 เครื่องจักรที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Induction Machine)

เครื่องจักรที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นแบบเฟสเดียว หรือ หลายเฟส โดยปกติแล้วเครื่องจักรที่เกิดจากการเหนี่ยวนำชนิดหลายเฟส (Poly Phase Induction Machine) มักจะหมายความถึงแบบที่เป็น 3 เฟส ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

- 1) แบบที่มีโรเตอร์คล้ายกรงกระรอก (Squirrel cage โรเตอร์) ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ต้องการใช้วงแหวน (slip ring) ติดอยู่ที่โรเตอร์ หรือเรียกว่า “Non-slip ring machines”
- 2) แบบที่โรเตอร์มีขดลวดพันอยู่รอบๆ (Wound โรเตอร์) การพันที่โรเตอร์นี้อาจจะเป็น 2 เฟส หรือ 3 เฟสก็ได้ โดยที่ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์นี้ จะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับที่มีอยู่บนสเตเตอร์ แบบนี้ต้องใช้วงแหวนติดไว้ที่บนโรเตอร์ เพื่อนำปลายของขดลวดที่พันอยู่บนโรเตอร์นั้นต่อออกมาข้างวงจรรภายนอก หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Slip ring machines”

ทั้งสองแบบนี้ต่างก็มีหลักการทำงานเช่นเดียวกันส่วนที่มีความแตกต่างก็เพียงแค่โครงสร้างของโรเตอร์ สำหรับส่วนของ สเตเตอร์ นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

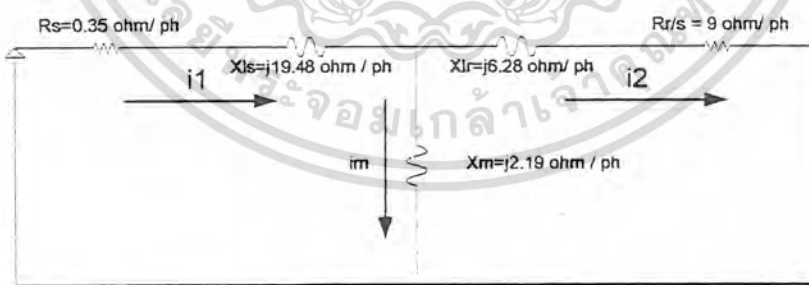
สำหรับ Project เรื่อง Studying of Wind turbine wound rotor induction generator นี้ได้มีการเลือก Induction machine ชนิด ววนน์โรเตอร์ มาศึกษาเพื่อให้มีพฤติกรรมเหมือนเป็น Generator

3.8 Parameter of wound rotor induction machine

- 1) Type: 3-phase , stator-connection: (Delta) ,rotor -connection: (Star) ,wound rotor induction machine

2) Rated power: H_p rate =10 hp(7.5 kw) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) Rated stator voltage: $V_s, \text{rated} = 415 \text{ v}$
- 4) Rated rotor voltage : $V_r, \text{rated} = 440 \text{ v}$
- 5) Rated stator current : $I_s, \text{rated} = 19 \text{ A}$
- 6) Rated rotor current : $I_r, \text{rated} = 11 \text{ A}$
- 7) Rated frequency: $f, \text{rated} = 50 \text{ Hz}$
- 8) Number of poles: $P = 6$
- 9) Rated stator speed : $N_s = (120 * f, \text{rated} / P) = 1000 \text{ rpm}$
- 10) Rated rotor speed : $N_r = 970 \text{ rpm}$
- 11) Stator resistance : $R_s = 1.06 \text{ ohm}, 0.35 \text{ ohm/ph}$
- 12) Rotor resistance : $R_r = 0.80 \text{ ohm}, 0.27 \text{ ohm/ph}$
- 13) Stator inductance: $L_s = 0.2065 \text{ H}, 0.069 \text{ H/ph}$
- 14) Mutual inductance : $L_o = 0.0664 \text{ H}$ (referred to the rotor) , 0.022 H/ph
- 15) Rotor inductance : $L_r = 0.0810 \text{ H}$ (referred to the rotor) , 0.027 H/ph
- 16) External inductance : $L_{ext} = 0.0320 \text{ H}$ (referred to the rotor) , 0.0106 H/ph
- 17) Mass moment of inertia of the โรเตอร์ : $J_m = 7.5 \text{ kg.m}^2$
- 18) สเตเตอร์-โรเตอร์ turns ratio (n) : 1.7
- 19) slip = $(N_s - N_r) / N_s = 0.03$



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

3.9 โครงสร้าง (Construction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เครื่องจักรเหนี่ยวนำตัวหนึ่งๆ นั้น ต่างก็ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ 2 ส่วนคือ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สเตเตอร์

สเตเตอร์ จะมีขดลวดพันอยู่ในช่อง (slot) และการพันนี้อาจจะเป็นแบบ 1 เฟส หรือ 3 เฟสก็ได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ 3 เฟส การพันแบบ 3 เฟสนี้จะต้องมีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้นตามที่ต้องการ

2) โรเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.1) แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) แบบนี้ประกอบด้วยตัวนำที่ฝังอยู่ภายในโรเตอร์ ปรอบๆตามผิวทรงกระบอกกลม โดยตัวนำทั้งชุดนี้ต่างก็ถูกลัดวงจรที่ปลายทั้งสองด้านของโรเตอร์ด้วยตัวนำที่เป็นรูปวงแหวน ซึ่งอาจจะเป็นทองแดง หรือทองเหลือง ก็ได้ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวโรเตอร์ นี้ จะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดขึ้นที่ตัว สเตเตอร์ เสมอ โรเตอร์ แบบนี้ราคาถูกและแข็งแรง แต่แรงบิดเริ่มแรก (Starting Torque) ต่ำ โรเตอร์แบบนี้ส่วนใหญ่แล้วจะมีตัวนำที่ฝังลงไปในช่วงที่เฉียง (Skew Slots) กับแกน ซึ่งช่วยทำให้เครื่องจักรวิ่งได้เรียบยิ่งขึ้นโดยการลด Magnetic Hum

ข้อที่ควรสังเกตจาก โรเตอร์ แบบกรงกระรอกนี้ก็คือ ตัวนำของโรเตอร์ทุกๆตัว โคนลัดวงจรไว้ในตัวเองอย่างถาวร ฉะนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะนำความต้านทานภายนอกมาต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อใช้ในการช่วยทำให้เครื่องจักรเริ่มหมุน

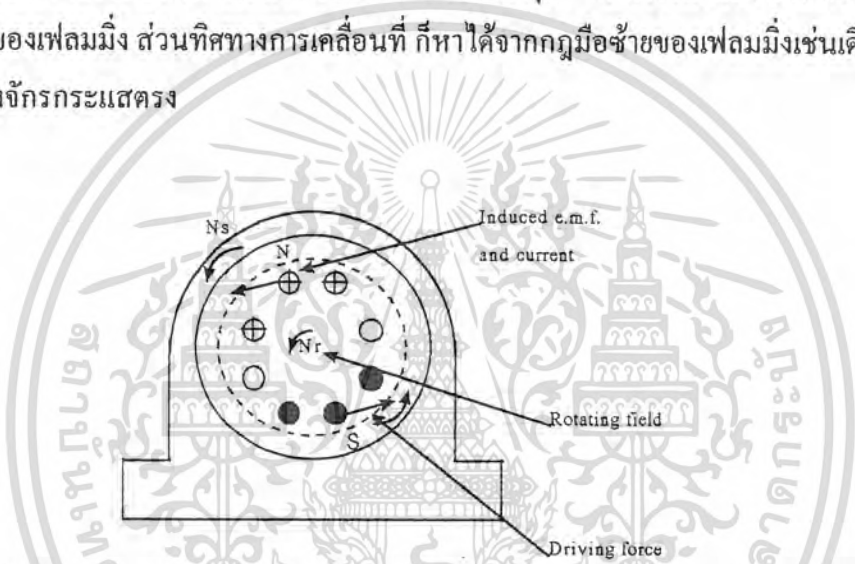
2.2) แบบใช้ขดลวดพันรอบ โรเตอร์ (วาวนโรเตอร์) การพันขดลวดรอบ โรเตอร์นี้มีลักษณะการพันเช่นเดียวกับที่ สเตเตอร์ โดยจะต้องพันให้มีจำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ ให้เท่ากับ จำนวนขั้วที่มีอยู่บน สเตเตอร์ ในขณะที่มันยังทำงานอยู่ จำนวนเฟสของ โรเตอร์ นี้ไม่จำเป็นต้องเท่ากับจำนวนเฟสที่อยู่บน สเตเตอร์ แต่เนื่องจากว่า เครื่องจักรชนิดนี้จะหมุน ได้ก็ต่อเมื่อวงจรที่โรเตอร์ ลัดวงจรครบในขดลวดที่พันอยู่บน โรเตอร์ หรือ โคนลัดวงจร ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงแหวนอื่นอีก 3 หรือ 4 วง เพื่อต่อตัวนำไปยังวงจรภายนอกเพื่อลัดวงจร หรือต่อกับความต้านทานภายนอก เพื่อใช้ในการเดินเครื่องด้วย

3.10 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

เครื่องจักรเหนี่ยวนำ (Induction Machine) นี้ ไม่มีวงจรไฟฟ้าเชื่อมกันระหว่าง สเตเตอร์ กับ โรเตอร์ กระแสที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์ ที่ไหลอยู่ภายในแท่งตัวนำ หรือขดลวดที่อยู่รอบๆ โรเตอร์ นั้นจะมีรูปร่างลักษณะคล้ายกับกระแสของขดลวด สเตเตอร์ หากไม่ได้ลัดถึงค่า Slot และปัญหาการอิ่มตัว ซึ่งเกิดจากจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใน โรเตอร์ นั้น ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนที่มาจาก สเตเตอร์ ซึ่งได้รับกำลังไฟฟ้าสลับมาจากแหล่งจ่ายภายนอก ขนาดของแรงเคลื่อนก็ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวนำของ โรเตอร์ ปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นนี้ มีหลักการคล้ายคลึงกับหม้อแปลงที่มีส่วน Secondary ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่สำหรับเครื่องจักรแบบเฟสเดียว ซึ่งมีการพันอยู่บน สเตเตอร์ นั้น ไม่อาจทำให้ส่วนของ โรเตอร์ เคลื่อนที่ได้ ทั้งนี้เพราะแรงบิดที่เกิดขึ้นบนตัว โรเตอร์ นั้น มีทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละครึ่งรอบ (cycle) ของแต่ละครึ่งของ ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในหนึ่ง cycle

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าหากว่ามีการพันขดลวดบนตัว สเตเตอร์ ตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไปแล้ว ก็จะทำให้เครื่องจักรหมุนได้ เช่น ถ้าพัน 2 ชุดก็เป็นเครื่องจักร 2 เฟส ถ้า 3 ชุดก็เป็นแบบเครื่องจักร 3 เฟส เป็นต้น อย่างไรก็ตามเครื่องจักรเฟสเดียวก็มีวิธีการทำให้หมุนได้หลายวิธี สนามแม่เหล็กถาวร ที่เกิดขึ้นบนตัว สเตเตอร์ นี้ จะหมุนคล้ายกับการหมุนของแม่เหล็กถาวรด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งทำให้เกิดการตัดของสนามแม่เหล็ก หรือมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กขึ้นบนตัวนำที่อยู่บนตัวโรเตอร์ ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงนั่นเอง เมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านตัวนำบนตัวโรเตอร์ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำในตัวโรเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ จะทำให้เกิดกระแสไหลในตัวนำขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ขึ้นที่โรเตอร์ ในทิศทางที่หมุนไปทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำได้ โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ ก็หาได้จากกฎมือซ้ายของเฟลมมิ่งเช่นเดียวกับการหาทิศทางของ เครื่องจักรกระแสตรง



รูปที่3.8 Induce Rotor Current and Torque Directions (Two -pole Machine)

จากรูปจะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของตัว โรเตอร์ นั้น ไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน ดังนั้นแรงบิดจะเกิดขึ้น ได้ก็ต่อเมื่อความเร็วของโรเตอร์ มีค่าน้อยกว่าความเร็วที่ซิงโครนัส

Slip คือ อัตราส่วนของความเร็ว ที่เกิดจากความแตกต่างของความเร็วที่ โรเตอร์ กับความเร็วที่ซิงโครนัส ของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นในเครื่องกล ไฟฟ้านั้นๆ ตามสมการ

$$\% \text{ Slip}(s) = (N_s - N_r) / N_s * 100 \tag{3.9}$$

โดยที่ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส เท่ากับ $120 * f / p$ (rpm)

N_r คือ ความเร็วของโรเตอร์ (rpm)

f คือ ความถี่ของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ สเตเตอร์ ปกติจะมีค่าเท่ากับ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (pole)

$$N_r = (1-s) N_s$$

เมื่อ $s = 1$ นั่นคือ $N_r = 0$

เมื่อ $s = 0$ นั่นคือ $N_r = N_s$

ปกติแล้วเครื่องจักรจะมีค่า Slip ประมาณ 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับการโหลด โดยมีภาระเต็มที่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อภาระที่ได้รับน้อยลงไปก็จะทำให้ Slip ลดลงไปด้วย

3.11 การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ (Speed Control of an Induction Machine)

เครื่องจักรที่นำมาใช้งานส่วนใหญ่ นั้น ต้องการให้มีความเร็วคงที่หรือเกือบคงที่ ดังนั้นการนำเครื่องจักรเหนี่ยวนำมาใช้งานบางทีก็ต้องการเปลี่ยนหรือควบคุมความเร็ว ตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการควบคุมความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำได้ 3 วิธีคือ

1. โดยการเปลี่ยนค่า Slip(s) ซึ่งได้จากความสัมพันธ์

$$N_r = (1-s) N_s = (1-s) 120 * f / p$$

สำหรับ เครื่องจักรเหนี่ยวนำชนิดความเร็วโรเตอร์ นั้น อาจมีการปรับความเร็วของเครื่องจักรที่ได้รับภาระ (Load) ขนาดหนึ่งได้โดยการเปลี่ยนค่า Slip (s) การเปลี่ยนค่า Slip นี้ทำได้โดยการเปลี่ยนแปรค่าความต้านทานในวงจรของโรเตอร์โดยที่เรทราบจากสมการของคุณลักษณะของแรงบิด (Torque Characteristic) ซึ่งเมื่อเครื่องจักรวิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่งที่มีค่า Slip เท่ากับ s หนึ่งๆ ซึ่งจะได้สมการแรงบิด นั่นคือ

$$T = K \frac{sE^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \quad (3.10)$$

$$K = 3 / (2 \pi N_s)$$

จากสมการข้างบนจะพบว่า K, E, R_2, X_2 เป็นค่าคงที่ ดังนั้นก็จะพบว่าแรงบิด T มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Slip นั่นคือค่าแรงบิด T จะมีค่าสูงสุดจากการเปลี่ยนแปลงของค่า Slip ก็ต่อเมื่อ

$$\frac{dT}{ds} = 0$$

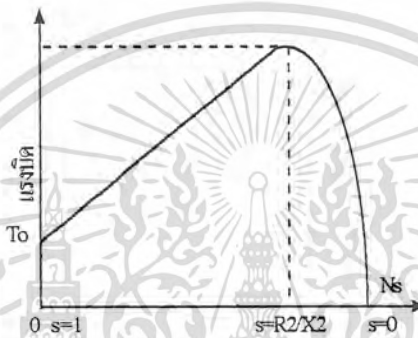
เพราะฉะนั้นจะได้ $R_2^2 = s^2 X_2^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ
$$s = \frac{R2}{X2}$$

แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้น
$$T_{\max} = \frac{KE2^2 \frac{R2}{X2} R2}{R2^2 + \frac{R2^2}{X2^2} X2^2} \quad (3.11)$$

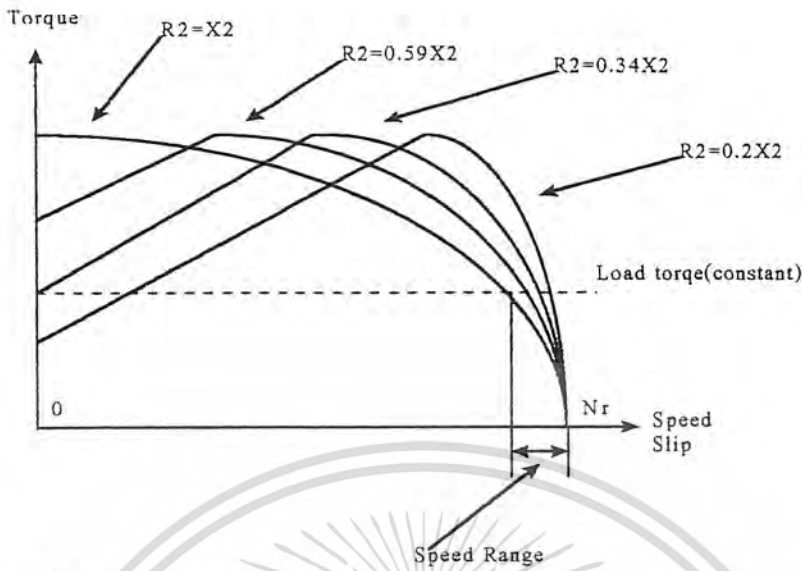
แรงบิดสูงสุดเท่ากับ
$$= K \frac{E2^2}{2X2}$$



รูปที่ 3.9 แรงบิด ต่อ ค่า Slip ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

จากสมการข้างต้นของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นจะพบว่า ไม่ขึ้นอยู่กับความต้านทานของ โรเตอร์ และจะมีค่าสูงสุดของแรงบิดที่ค่าหนึ่งเท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน $R2$ ของวงจรรโรเตอร์ แต่จะขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ ($X2$) เท่านั้น จากสมการ $s = \frac{R2}{X2}$ พบว่าค่าสลิป ที่จุดแรงบิดสูงสุดนั้นมีค่าน้อยลงไป เมื่ออัตราส่วนของ $R2$ คือ $X2$ น้อยลงไป แสดงคุณลักษณะของแรงบิด-ค่าสลิป หรือ แรงบิด-ความเร็ว ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำตัวหนึ่ง ดังนั้นค่าความเร็วของเครื่องจักรที่ถูกปรับ ณ ค่าภาระ (Load) ที่คงที่ค่าหนึ่งก็จะมีเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำชนิดความถี่โรเตอร์
โดยการปรับค่าความต้านทานภายนอก

การปรับความเร็วที่ค่าภาระ (Load) อันเดียวกันนี้ ได้ค่าความเร็วใกล้เคียงกับค่าความเร็วที่ พิกัดดัง แสดงดังรูปข้างบน ซึ่งมีการปรับความเร็ว 4 ค่า โดยมีค่าความต้านทานที่ปรับอยู่ 4 ตำแหน่งเท่านั้น ในการปรับความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำชนิดความถี่โรเตอร์ ด้วยการปรับค่าความต้านทานนั้นมันจะมีข้อเสียคือ

1) มีความร้อนสะสมเกิดขึ้นในความต้านทานที่ใช้ปรับ และปรับได้เป็นขั้นๆ ความเร็วที่ต้องการปรับ นั้นขึ้นอยู่กับ (Load torque) ที่มีการเปลี่ยนไป และมีช่วงการปรับความเร็วได้แคบจึงได้มีการปรับปรุงโดยใช้หลักการของทฤษฎีของการคืนรูปพลังงานสลิป

2. การเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กบนตัว สเตเตอร์ ปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมในการปรับความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำด้วยวิธีนี้เท่าใดนัก เพราะเป็นการยุ่งยากที่จะต้องมีการกำหนดความเร็วของเครื่องจักรตั้งแต่ทำการผลิต และเครื่องจักรในแต่ละตัวจะมีความเร็วที่คงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถทำการปรับเปลี่ยนความเร็วได้โดยสะดวกในการเปลี่ยนความเร็วจะต้องมีการเปลี่ยนตัวเครื่องจักรด้วย ซึ่งเครื่องจักรในแต่ละตัวจะมีความเร็วของมันโดยเฉพาะ

3. การเปลี่ยนแปรความถี่ ปัจจุบันการปรับความเร็วของเครื่องจักรเหนี่ยวนำด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมกัน อย่างแพร่หลาย เพราะปัจจุบันเรามี อินเวอร์เตอร์ช่วยในการปรับความถี่ได้ตามที่ต้องการโดยละเอียด ตามสมการ $N_s = 120 * f / p$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยมีการกำหนดจำนวน p (ขั้วแม่เหล็ก) ให้คงที่ จะทำให้ความเร็วของเครื่องจักรเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 การควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์

3.12.1 บทนำ

การควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำด้วยการต่อสเตเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและทางด้าน โรเตอร์ต่อเข้ากับ PWM คอนเวอร์เตอร์ในวงจรโรเตอร์ วิธีการควบคุมนี้เป็นพื้นฐานในการควบคุมแบบเวกเตอร์ ใน Project นี้แบบจำลองของเครื่องจักรเหนี่ยวนำจะอยู่ในแกนอ้างอิงแบบสเตเตอร์ เจื่อนไขสำหรับการควบคุมนี้จะเป็นแบบการควบคุมสเตเตอร์ฟลักซ์และการไหลของพลังงาน(Power flow)ในการออกแบบ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากกระแสโรเตอร์และกระแสกระตุ้นที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็ว

3.12.2 การควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการแบบเวกเตอร์

เทคนิคในการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์นี้ เนื้อหาหลักของเทคนิคการควบคุมจะอยู่ที่ การควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำให้สามารถมีพฤติกรรมเหมือนกับเป็นเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น(Separate Excite D.C. machine) ในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงแบบอุดมคติจะไม่เกิดการอ้อมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กและปฏิกิริยาจากการเกิดอาร์มเจอร์รีแอกชัน ซึ่งเป็นผลทำให้แรงบิดที่ได้เป็นผลที่เกิดจากกระแสกระตุ้นและกระแสอาร์มเจอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ทิศทางการควบคุมเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะประกอบด้วยกระแส 2 ชนิดที่มีการควบคุมที่เป็นอิสระต่อกัน ที่สามารถแยกออกเป็น 2 แกน ตั้งฉากกัน และจะเหมือนกับการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งกระแสกระตุ้นจะทำหน้าที่ในการปรับฟลักซ์แม่เหล็กในเครื่องจักร และแรงบิดที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมด้วยกระแสอาร์มเจอร์ เพราะว่ากระแสกระตุ้นและกระแสอาร์มเจอร์เป็นอิสระในการควบคุมซึ่งกันและกัน และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างใดอย่างหนึ่ง ก็จะไม่มีการไปกระทบต่อกระแสที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของแรงบิดในสภาวะคงตัวและที่สภาวะไม่เสถียร การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์มเจอร์ ถ้าหากเปรียบเทียบกับการควบคุมของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แปลงไปอยู่ในแกนอ้างอิง d และ q หรือแกนหมุนแล้วสามารถเปรียบเทียบได้ว่า กระแส ในแกน direct และ quadratic จะเปรียบเทียบได้กับกระแสกระตุ้นและกระแสอาร์มเจอร์ในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับการต่อเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า การควบคุมแบบเวกเตอร์จะแสดงให้เห็นถึง การควบคุมพลังงานที่เป็นอิสระต่อกัน คือ แอคทีฟพาวเวอร์หรือพลังงานที่ใช้ในการสร้างแรงบิด และ รีแอกทีฟพาวเวอร์ซึ่งใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก เพราะว่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายด้วย (โดยไม่คิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานทางด้านสเตเตอร์) กระแสกระตุ้นในโรเตอร์จะเป็นตัวปรับขนาดและทิศทางของรีแอกทีฟพาวเวอร์ที่ส่งผ่านเข้ามาทางด้านสเตเตอร์

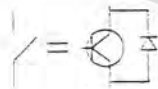
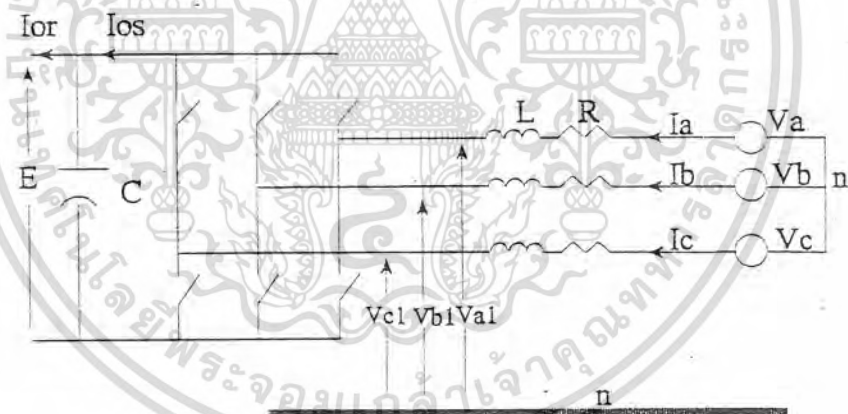
โดยทั่วไป การควบคุมแบบเวกเตอร์ซึ่งใช้แกนอ้างอิงทางสเตเตอร์จะสามารถบอกตำแหน่งของเวกเตอร์ได้ทั้งทางด้านสเตเตอร์แอร์แกนหรือโรเตอร์ ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13 Front-end converter

คอนเวอร์เตอร์แบบจ่ายพลังงานได้สองทางถูกนำมาใช้เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของ Doubly-fed induction generator (DFIG) ให้ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์สามารถจ่ายพลังงานที่ความเร็วซิงโครนัส (supersynchronous speed) ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ประเภทนี้จะประกอบด้วย three-phase voltage-fed PWM converter 2 ตัว โดยในบทนี้จะกล่าวถึง Front-end converter หรือคอนเวอร์เตอร์ด้านแหล่งจ่ายและการควบคุม คอนเวอร์เตอร์แบบนี้มีลักษณะเป็นคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source converter) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมจ่ายแรงดันดีซีเชื่อมโยง (DC-link voltage) ที่จ่ายให้กับโรเตอร์ให้คงที่ โดยไม่คำนึงถึงทิศทางและขนาดของกำลังสลิป การใช้ PWM เข้ามาช่วยขจัดฮาร์โมนิกที่ต่ำระดับต่างๆ และการควบคุมการไหลของรีแอคทีฟเพาเวอร์ เพื่อปรับมุม lead-lag ของกระแสกับแรงดันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ทั่วไปจะเป็นแบบควบคุมสเกลาร์ (scalar control) และแบบควบคุมเวกเตอร์ (vector control) ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงข้อแตกต่างของการควบคุมทั้งสองแบบและบอกถึงเหตุผลที่เลือกใช้วิธีควบคุมเวกเตอร์มาควบคุมคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.11 ลักษณะของ Front-end converter

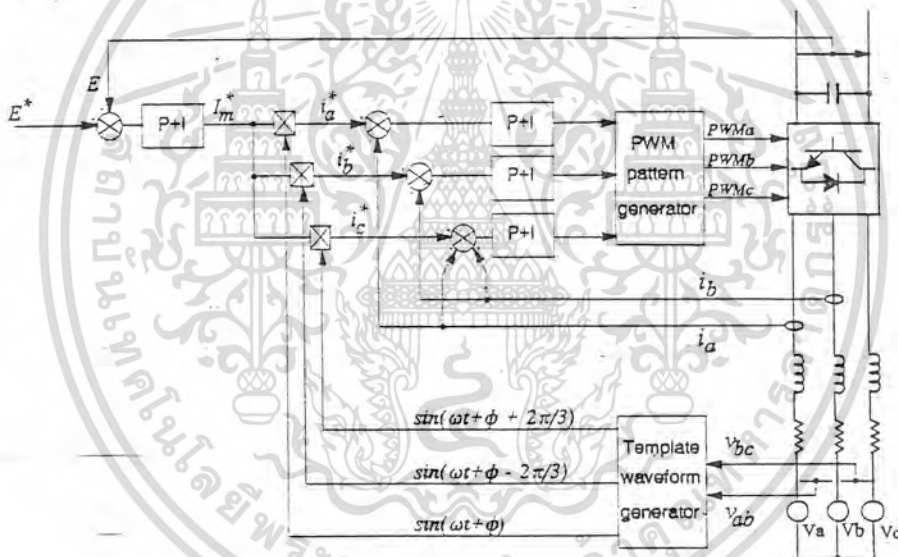
3.14 วิธีการควบคุม Front-end converter

แรงดันดีซีเชื่อมโยงถูกกำหนดขึ้นมาจากขบวนการความคลาดเคลื่อนแรงดันดีซีเชื่อมโยง โดยปกติจะใช้ PI controller กำหนดค่าเอาท์พุทอ้างอิงสำหรับแหล่งจ่ายกระแสเพื่อสมดุลแอกทีฟเพาเวอร์ (active power) วิธีที่ใช้กำหนดค่าอ้างอิงนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ
ไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14.1 วิธีควบคุมสเกลาร์

เอาต์พุต(output) ส่วนควบคุมแรงดันดีซีซึ่งเชื่อมโยงจะกำหนดเพียงขนาดอ้างอิงของกระแสไลน์ทูไลน์เท่านั้น รูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (reference current waveform) จะได้จากการคูณกันระหว่างเอาต์พุตของส่วนควบคุมแรงดันดีซีซึ่งเชื่อมโยงกับรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันแหล่งจ่าย มุมที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันกับกระแสจากแหล่งจ่ายที่ต้องการจะใช้ปรับมุมเฟสระหว่างแรงดันแหล่งจ่ายกับ template waveform ถ้าต้องการให้ displacement angle เป็นยูนิตี (unity) ต้องทำให้ template signal เฟสตรงกันกับแรงดันแหล่งจ่าย

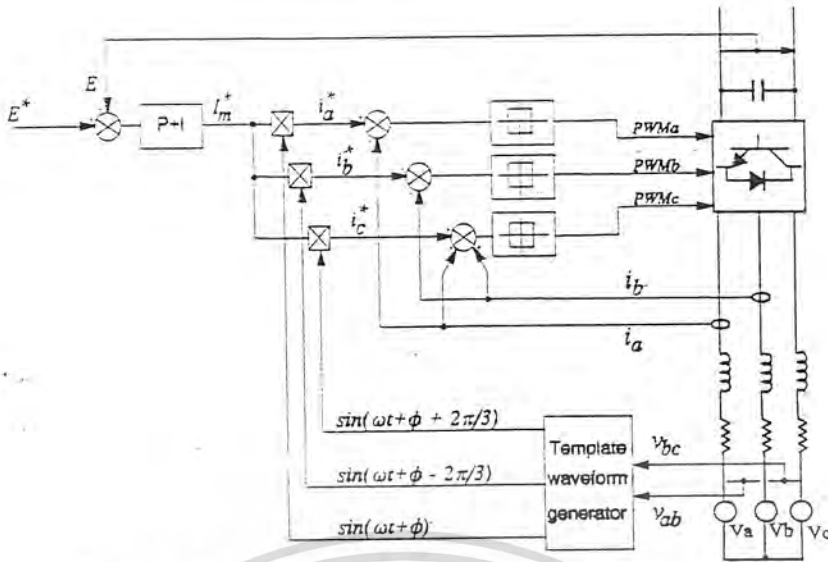
เพื่อควบคุมให้กระแสไลน์เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง มีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีแรก ใช้ตัวควบคุม (ปกติจะใช้ PI controller) ซึ่งจะอาศัยความคลาดเคลื่อนจากกระแสเพื่อกำเนิดสัญญาณอ้างอิงสำหรับ PWM โมดูเลชัน (PWM modulation) ซึ่งใช้ในการควบคุมการสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ แต่ปัญหาที่พบคือจะเกิดความคลาดเคลื่อนของกระแสขณะ steady state ซึ่งเป็นที่มาจากอินพุตอ้างอิงที่จ่ายให้กับ PI controller ที่เป็น สัญญาณกระแสสลับที่มีความถี่แหล่งจ่ายขณะ steady state



รูปที่ 3.12 วิธีควบคุมสเกลาร์ด้วย PI current control

วิธีที่สองใช้ hysteresis (bang bang) controller เพื่อควบคุมกระแสให้ไหลตามที่กำหนดไว้ วิธีนี้จะมีช่วงควบคุมกระแสกว้าง แต่มีข้อเสียที่ความถี่ในการสวิตช์เปลี่ยนแปลงตลอดและ high harmonic distortion ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วิธีควบคุมสเกลาร์ด้วย hysteresis current control

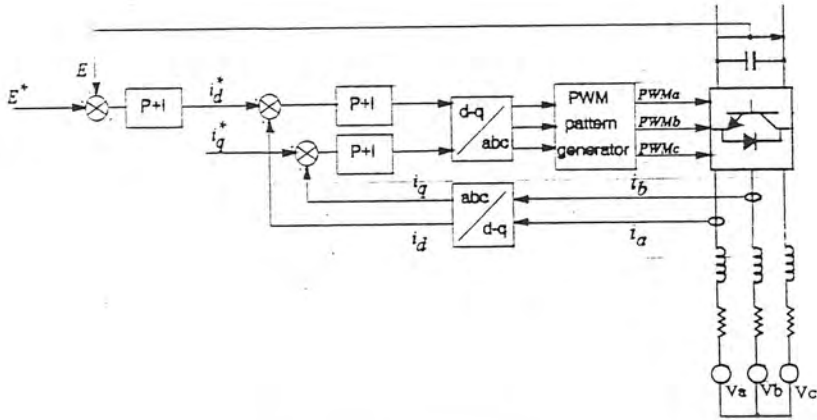
วิธีการที่ได้อธิบายไปนั้นจะพิจารณาในขณะ steady state ซึ่งวิธีนี้มีการปฏิบัติงานในช่วงไดนามิกส์ที่ไม่ดีและการออกแบบรูปควบคุมมีความซับซ้อนมาก และไม่สามารถควบคุมแอมพลิฟายเออร์ได้อย่างอิสระขณะทรานเซียนต์

3.14.2 วิธีควบคุมแอมพลิฟายเออร์

แรงดัน 3 เฟสและกระแสขณะเวลาใดๆของแหล่งจ่ายจะถูกแปลงให้อยู่ในแกน d-q อ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมแหล่งจ่าย (ω_s) ในขณะ steady state , แรงดันสามเฟสที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในปริมาณดีซี ถ้าแกนใดแกนหนึ่ง ซึ่งปรกติจะเป็นแกน d ถูกกำหนดให้มีทิศทางเดียวกับแอมพลิฟายเออร์ของแรงดันแหล่งจ่าย จะเป็นผลให้แกน d และ q ของกระแสจะกลายเป็นแกนที่แสดงถึง แอมพลิฟายเออร์และรีแอมพลิฟายเออร์ตามลำดับ ซึ่งจะทำได้สามารถควบคุมปริมาณทั้งสองนี้ได้อย่างอิสระ

วิธีการนี้ ส่วนควบคุมแรงดันดีซีเชื่อมโยงจะเป็นตัวกำหนดแอมพลิฟายเออร์ ขณะที่รีแอมพลิฟายเออร์จะถูกกำหนดโดยเอาที่พิกซ์ของส่วนควบคุมรีแอมพลิฟายเออร์หรือจากปรับมุมระหว่างแรงดันกับกระแส ดังนั้นข้อดีหลักๆของการใช้การควบคุมแอมพลิฟายเออร์คือสามารถควบคุมการไหลของแอมพลิฟายเออร์และรีแอมพลิฟายเออร์ในคอนเวอร์เตอร์ได้โดยตรง ทั้งในขณะทรานเซียนต์และ steady state และการตอบสนองของรูปควบคุมกระแส (current control loop) สามารถทำได้ดี นอกจากนี้การควบคุมกระแสไฟตรงด้วยการใช้ PI control จะไม่เกิดความคลาดเคลื่อนขณะ steady state ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่เลือกใช้วิธีนี้มาควบคุม front-end converter ดังรูปที่ 3.14 ที่แสดงโครงสร้างการควบคุมด้วยวิธีควบคุมแอมพลิฟายเออร์ซึ่งช่วงต่อไปจะแสดงถึงโมเดลและการวิเคราะห์ front-end converter โดยใช้วิธีควบคุมแอมพลิฟายเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



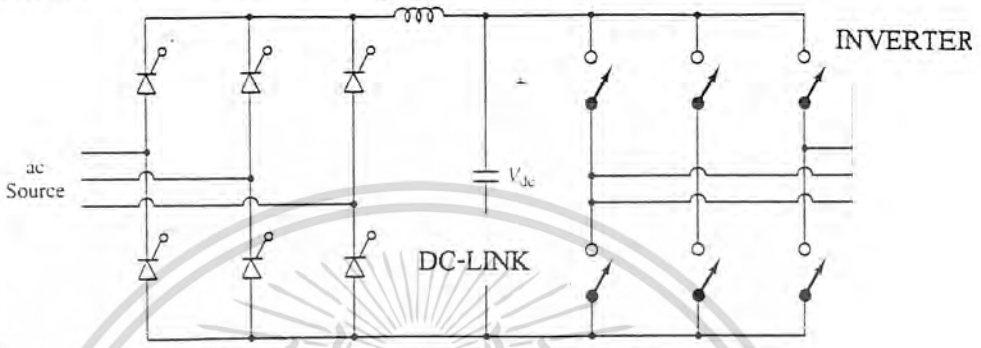
รูปที่ 3.14 วิธีควบคุมเวกเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.15 VSI (Voltage source inverter)

Voltage Source Controller หรืออาจจะเรียกว่า AC - AC Converter With DC Link เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของแรงดันและความถี่ VSI จะประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกัน คือ คอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว ซึ่งตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์ (Voltage Controller) และอีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็น อินเวอร์เตอร์ (Frequency Controller) เชื่อมต่อกันด้วย DC Link ดังรูป



รูปที่ 3.15 AC to AC Converter With DC Link

สำหรับการทำงานของอุปกรณ์ ควบคุมชิ้นนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนที่เปลี่ยนจาก AC-->DC (Rectifier) โดยมีเรนท์การทำงานของมุมทริก (Firing Angle) อยู่ที่ 0 ถึง 90 องศา และส่วนที่เปลี่ยนจากกระแสไฟ DC-->AC (Inverter) โดยช่วงการทำงานจะอยู่ที่มุมทริก 90 ถึง 180 องศา ลำดับต่อไปเป็นการแยกศึกษารายละเอียดของแต่ละส่วนอย่างชัดเจนดังนี้

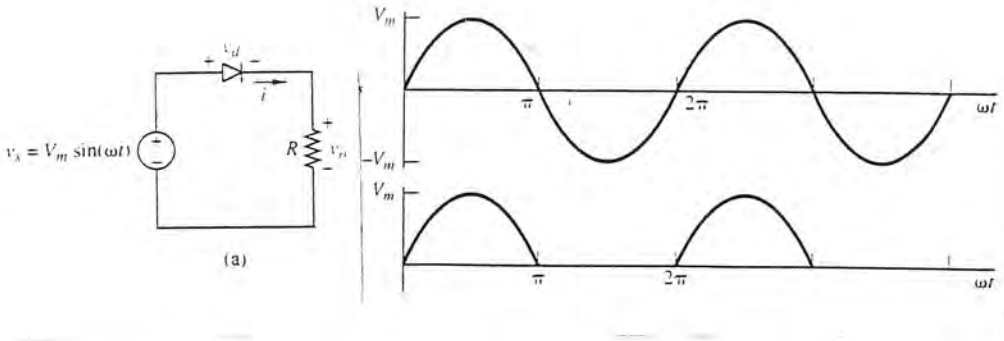
3.15.1 เรกติไฟเออร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงสัญญาณไฟ AC เป็นสัญญาณไฟ DC โดยอาศัยคุณสมบัติของ Diode หรือ ไทริสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทิศทางเดียว ใช้งานในช่วง Forward Bias สำหรับการเรียงกระแสไฟ DC

เราสามารถทำความเข้าใจรายละเอียดของเรกติไฟเออร์ ได้จากวงจรพื้นฐาน

1) PHASE HALF WAVE RECTIFIE

- สำหรับโหลดความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจร Half Wave Rectifier Load R และ Voltage Waveform

จากรูป แสดงให้เห็นว่าแรงดันของ โหลด (V_o) จะมีเฉพาะซีกบวก เป็น ไปตามคุณสมบัติของ ไทริสเตอร์ ซึ่งยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว

องค์ประกอบที่ควรสนใจประกอบด้วย มุม α, β, γ โดยที่

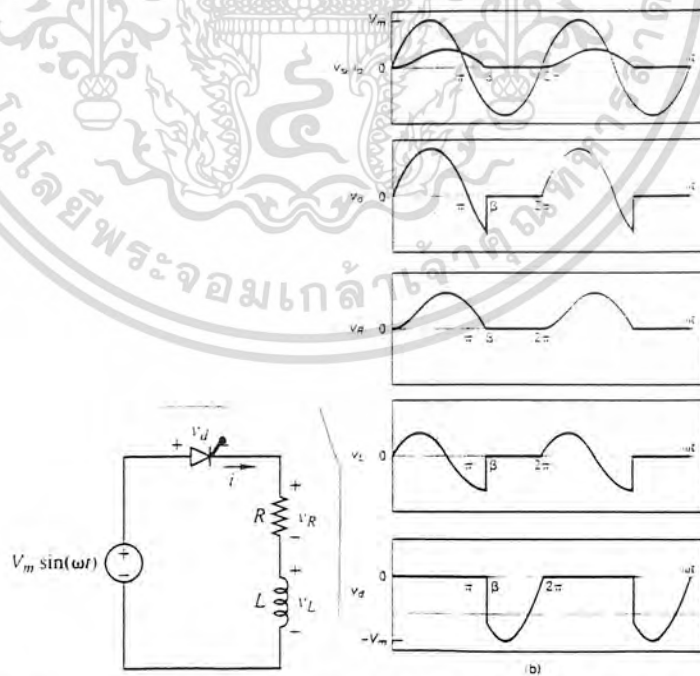
α คือ มุม ทริกขาแรกของ ไทริสเตอร์ (Firing Angle)

β คือ มุมดับกระแส (ในช่วง Interval Time ที่ยังมีกระแสไหลอยู่ ขณะที่แรงดัน เปลี่ยนสถานะเป็นลบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของความเหนี่ยวนำ

γ คือ มุมของความต้านทานโหลด

จากรูปที่ 3.16 มุมทริกและมุม $\beta = 0$ เนื่องจากโหลดเป็น Pure Resistance

- สำหรับ โหลด R-L



รูปที่ 3.17 Half Wave Rectifier Circuit of Load R-L และ Voltage Waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจร เราจะได้ว่า

$$Ri + L \frac{di}{dt} = V_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.12)$$

จากสมการข้างต้น จะได้ว่ารูปของกระแส คือ

$$i = \frac{V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - \sin(\alpha - \gamma) e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (3.13)$$

จากสมการของกระแสข้างต้น จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนของ $V_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma)$ เป็นส่วนของกระแสปกติที่ช่วยในการเข้าสู่สภาวะคงตัว และในส่วนของ $V_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma) e^{-\frac{Rt}{L}}$ เป็นส่วนของกระแส ทรานเซียนต์ ซึ่งจะหายไปเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อ $t \rightarrow \infty$

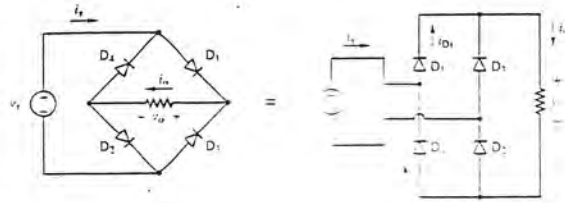
จากรูปที่ 3.17 มุมทริกของ ไทริสเตอร์ (α) มีค่าเป็นศูนย์ ส่วนมุม γ เป็นมุมที่กระแส Fundamental i_L ตามแรงดัน เราสามารถหามุม γ หรือ Load Impedence ได้จาก

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (3.14)$$

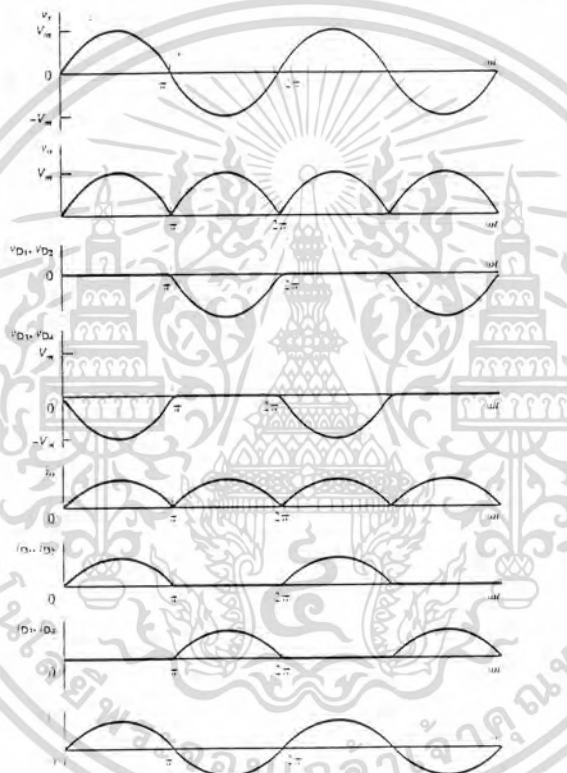
2) 1 Phase Full Wave Rectifier ลักษณะการทำงานจะคล้ายกับ Half Wave Rectifier แต่จะมีการกระเพื่อมของแรงดันน้อยกว่า Half Wave Rectifier

สำหรับโหลดความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 Full Wave Bridge Rectifier With R Load

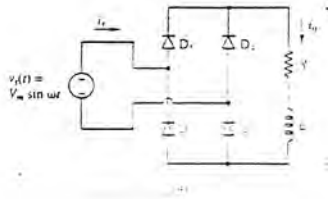


รูปที่ 3.19 Waveform ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

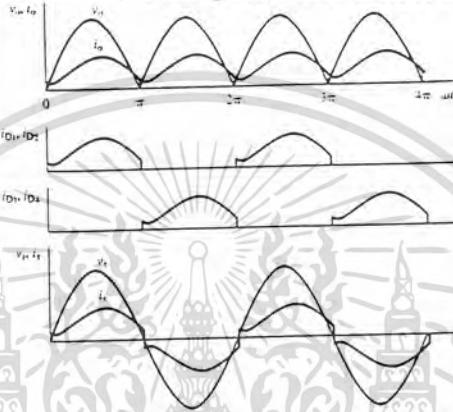
จากรูปวงจรไดโอดนี้เสมือนที่ ไทริสเตอร์ มีมุม $\alpha = 0$ การทำงานจะสลับกันระหว่างคู่ของ (D1, D2) และ (D3, D4) ในช่วงไฟบวกและไฟลบตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำหรับ LOAD R-L



รูปที่ 3.20 Full Wave Bridge Rectifier With R-L Load



รูปที่ 3.21 Waveform ของกระแสที่ไหลผ่าน ไดโอด แรงดันแหล่งจ่ายและแรงดันขาออก

Waveform ของ i_o ซึ่งแตกต่างจาก Load R ผลมาจากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีการเหนี่ยวนำของกระแส ($\gamma > \alpha$) ทำให้เกิดความต่อเนื่องและเสริมกันของกระแส สำหรับการคำนวณ V_o, i_o ในส่วน ขาออกของ เรกติฟายเออร์ เป็นดังนี้ ถ้าเป็น Half Wave Rectifier

$$V_o(\pi + \beta) = \int_{\alpha}^{\pi + \beta} V_m \sin \omega t d\omega t$$

$$V_o = V_m (1 + \cos \omega t) \tag{3.15}$$

และ $i_o = V_o / R \tag{3.16}$

สำหรับ โหลดความต้านทาน จะมีค่า β เป็นศูนย์

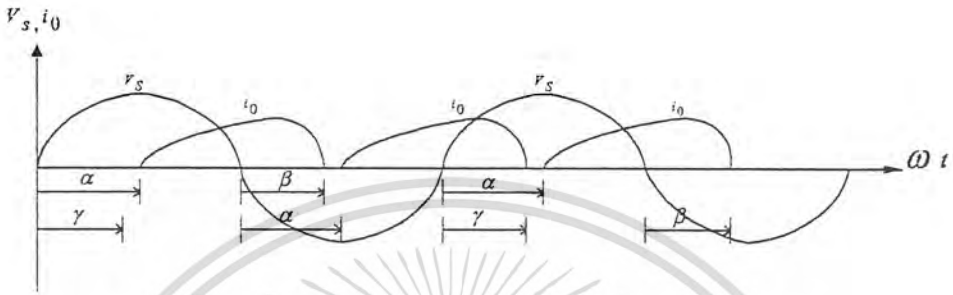
ถ้าเป็น Full Wave Bridge Rectifier จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณีแรก กระแสมีความไม่ต่อเนื่อง ($\alpha > \beta$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o(\pi) = \int_{\alpha}^{\pi+\beta} V_m \sin \omega t d\omega t$$

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha + \cos \beta) \tag{3.17}$$

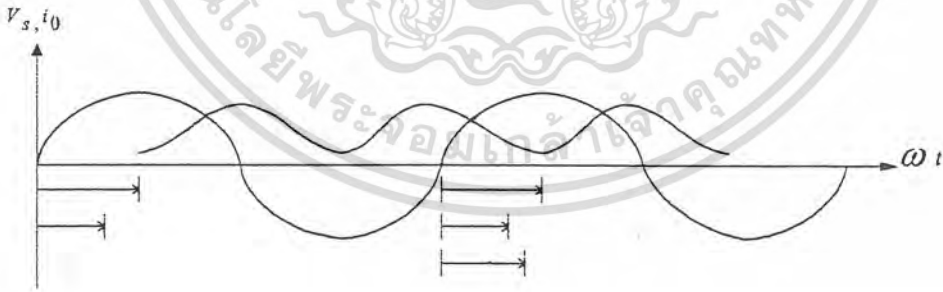


รูปที่ 3.22 Voltage And Current Waveform

กรณีที่สอง กระแสมีความต่อเนื่อง ($\gamma > \alpha$)

$$V_o(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\beta} V_m \sin \omega t d\omega t$$

$$V_o(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \tag{3.18}$$



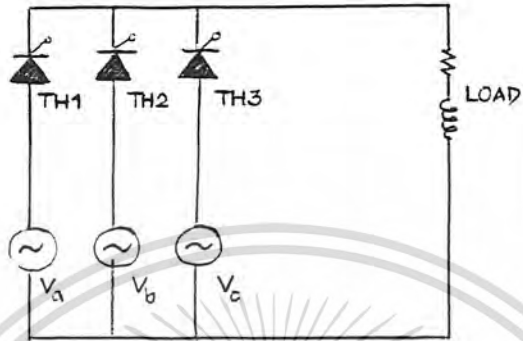
รูปที่ 3.23 Voltage And Current Waveform

ในส่วนนของ i_o จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_o = \frac{V_o}{R} \quad (3.19)$$

3) Three Phase Rectifier



รูปที่ 3.24 Three Phase Rectifier With R-L Load

ในส่วนการทำงานของไทรสเตอร์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับมุมทริกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับเปรียบเทียบแรงดันระหว่างเฟสด้วย โดยมีลักษณะการทำงานดังตาราง

	FORWARD	ON
TH1	$V_a > V_c$	$V_b > V_c$
TH2	$V_b > V_a$	$V_c > V_b$
TH3	$V_c > V_b$	$V_a > V_c$

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบแรงดันสำหรับการทำงานของ เร็คติไฟเออร์ 3 เฟส

สำหรับการคำนวณ แรงดันขาออก (V_o)

$$V_o = \frac{3}{\sqrt{2\pi}} V_{rms} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos\alpha \quad (3.20)$$

V_{rms} จัดอยู่ในรูป V_{phase} ในรูปสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = 0.675V_{L-L} \cos \alpha \quad (3.21)$$

3.15.2 DC - LINK

ประกอบด้วยตัวเก็บประจุทาง ด้านขาออกเพื่อทำหน้าที่ที่ปรับปรุงกระแสตรงให้มีความสม่ำเสมอ และ ตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ระหว่างเรกติฟายเออร์ กับ CAPACITOR เพื่อปรับปรุงคุณภาพแรงดัน จุดจัดการกระเพื่อมของแรงดันทั้งด้านเรกติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ และยังช่วยลด Distortion ด้วย

$$\text{จากที่} \quad I_{dc} = \frac{V_{dc} - E_{av}}{R_f} \quad (3.22)$$

หากค่า Filter Resistant มีค่าต่ำแล้ว จะได้ว่า $V_{dc} = E_{av}$ โดยที่

V_{dc} คือแรงดันขาออกของเรกติฟายเออร์

E_{av} คือแรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

และในที่สุด จะได้ผลออกมาในรูปของสมการ

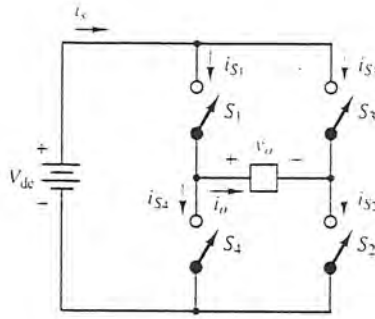
$$V_{dc} = 1.35S \frac{n_s}{n_p} E_{rms} \quad (3.23)$$

3.15.3 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ หรือ Frequency Controller เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้งานสำหรับการแปลงกระแสไฟ DC--> AC มีการทำงานในช่วงมูทริกซ์ 90 – 180 องศา โดยที่จะมีการสวิตช์ ไทริสเตอร์ ทุกๆ 60 องศา และ ไทริสเตอร์ จะนำกระแส (On) อยู่ 120 องศา สำหรับการงานแบบ 2 Branch (ไทริสเตอร์ ทำงานที่ละ 2 ตัว) และจะนำกระแสอยู่ 180 องศา สำหรับการงานแบบ 3 Branch (ไทริสเตอร์ ทำงานที่ละ 3 ตัว)

สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์เบืองต้น ที่ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ จะใช้วงจรสวิตช์ต่อเข้ากับแรงดันไฟ กระแสตรง ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



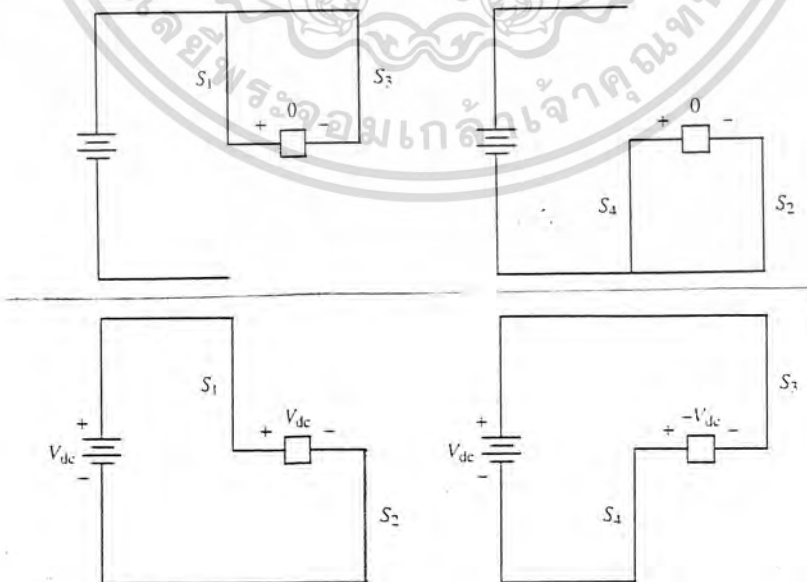
รูปที่ 3.25 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

มีหลักการการทำงานที่คล้ายกับ Full Bridge Diode Rectifier คือ มีการทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ (S_1, S_4) และ (S_2, S_3) ดังตาราง

Switches Closed	Output Voltage, v_o
S_1 and S_2	$-V_{dc}$
S_3 and S_4	$-V_{dc}$
S_1 and S_3	0
S_2 and S_4	0

ตารางที่ 3.2 การทำงานของคู่สวิตช์ และขนาดของแรงดันเอาต์พุต

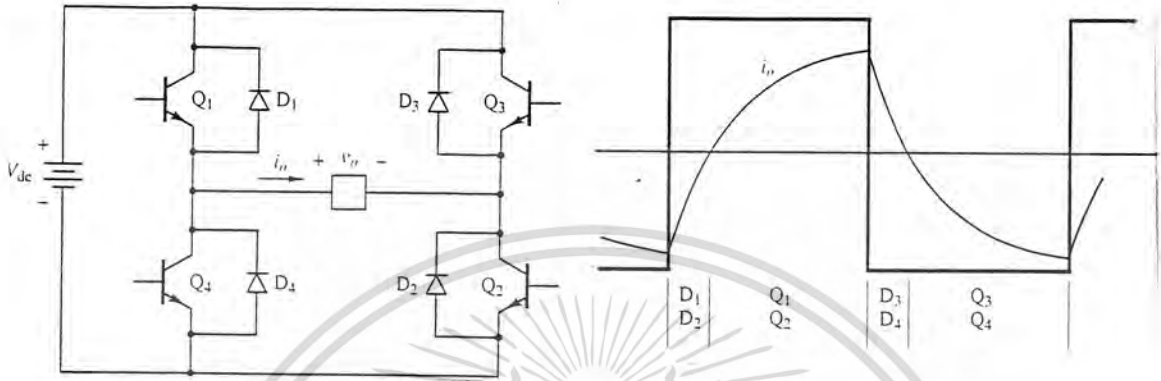
มีขั้นตอนการทำงานดังรูป



รูปที่ 3.26 แผนภาพการทำงานของคู่สวิตช์สำหรับวงจร อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจร อินเวอร์เตอร์ ที่ต่อโหลด R-L จะมีปัญหาเกิดขึ้น คือ เกิดการไหลของกระแสทั้งบวกและลบเพราะตัวเหนี่ยวนำจะสะสมพลังงานและมีการคืนพลังงานกลับมายังแหล่งจ่าย ซึ่งจะสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำกระแสในทิศทางเดียว เช่น ไดโอด ไทริสเตอร์ หรือ Transister ดังนั้นจึงมีการต่อ Feedback Diode เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสในช่วง Interval Time



รูปที่ 3.27 Inverter Circuit With R-L Load และแผนภาพแสดงช่วงการนำกระแสของ Transister และ ไดโอด

สำหรับการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านโหลด (ประกอบด้วย I_{force} และ $I_{natural}$) แบ่งออกเป็น 2 ช่วง

คือ

$0 < t < \frac{T}{2}$ สวิตช์ S_1, S_2 ทำงาน

$$I_o(t) = I_{force}(t) + I_{natural}(t)$$

$$I_o(t) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-\frac{t}{T}} \tag{3.24}$$

ที่ $t = \frac{T}{2}$ สวิตช์ S_1, S_2 จะเปิด และสวิตช์ S_3, S_4 จะทำงาน

$$I_o(t) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^{-\left(\frac{t-\frac{T}{2}}{T}\right)} \tag{3.25}$$

ตอนเริ่มต้น $t = 0$ กระแสจะมีค่าน้อยมาก ส่วนหนึ่งมาจากผลของทรานเซียนส์

$$I_o(t) = \frac{V_{dc}}{R} + A = I_{min}$$

$$A = I_{min} - \frac{V_{dc}}{R} \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

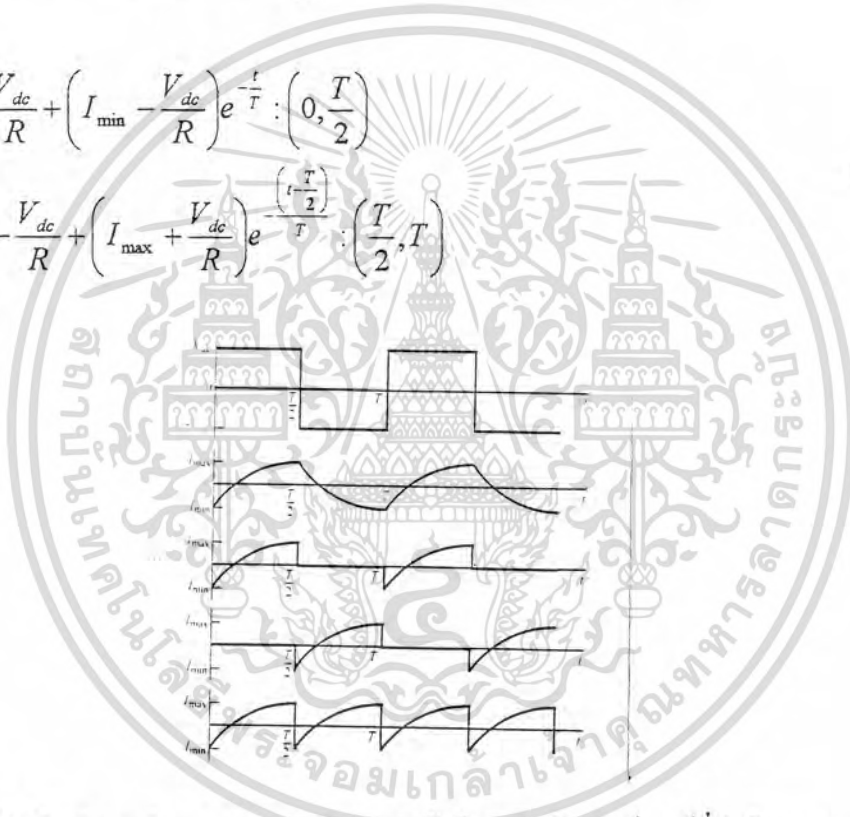
และที่ $t = \frac{T}{2}$ กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่ามากที่สุดก่อนจะดับสวิทช์

$$I_o\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{-V_{dc}}{R} + B = I_{\max}$$

$$B = I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \quad (3.27)$$

ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการในช่วงหลัง $\frac{T}{2} < t < T$ โดยอาศัยหลัก Symmetry

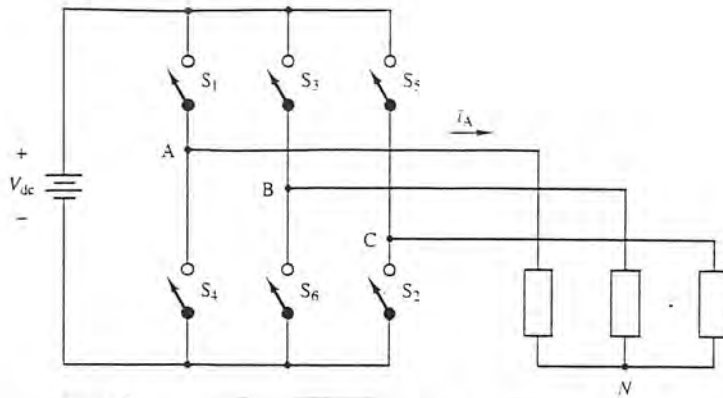
$$I_o(t) = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-\frac{t}{T}} : \left(0, \frac{T}{2}\right) \\ -\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-\frac{(t-T/2)}{T}} : \left(\frac{T}{2}, T\right) \end{cases} \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.28 Waveform ของกระแสและแรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่อโหลด R-L

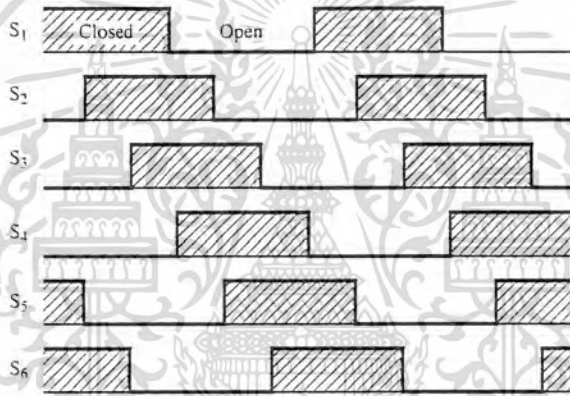
1) อินเวอร์เตอร์ 3 Phase เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สร้างไฟกระแสสลับ 3 เฟส จากไฟ DC มีวงจรพื้นฐานดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



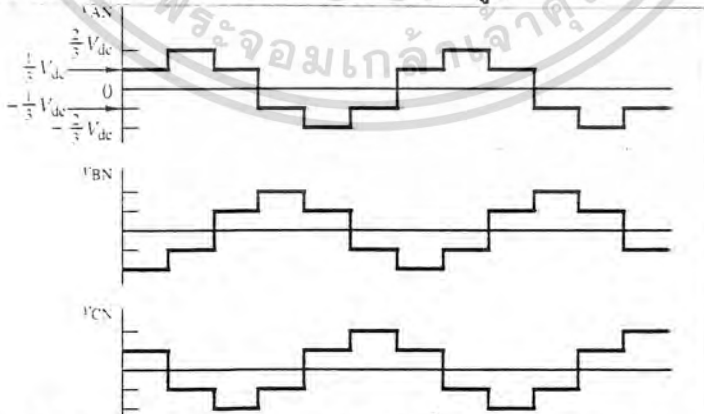
รูปที่ 3.29 3 Phase Inverter With Star Load

การทำงานจะเป็นแบบ 3 Branch คือ สวิตซ์ (Transister) จะทำงานทีละ 3 ตัวพร้อมกันโดยมีช่วงองศาการทำงาน 180 องศา มีการทริกซ์ห่างกัน 60 องศา ตามลำดับสวิตซ์ ลักษณะการทำงานเช่นนี้ เรียกว่า 6-Step มีแผนภาพการทำงานของสวิตซ์ดังนี้



รูปที่ 3.30 ไซเคิลการทำงานของสวิตซ์แต่ละตัวสำหรับการทำงานแบบ 3 Branch

เราสามารถคำนวณแรงดันเฟสแต่ละช่วง และได้แผนภาพแสดงดังรูป



รูปที่ 3.31 แผนภาพแสดงแรงดันเฟสทั้ง 3 เฟส ขณะ On Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภาพทั้งสองข้างต้น ทำให้สามารถคำนวณแรงดันเฟสและไลน์ได้ดังนี้

$$V_{an}(wt) = \frac{V_{dc}}{3} \left[\begin{array}{c} \frac{\pi}{3} \\ \frac{2\pi}{3} \\ \frac{\pi}{3} \\ \frac{4\pi}{3} \\ \frac{5\pi}{3} \\ \frac{2\pi}{3} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 2 \int_0^{\frac{\pi}{3}} dwt + 4 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} dwt + 2 \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} dwt - 2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} dwt - 4 \int_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{3}} dwt - 2 \int_{\frac{5\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} dwt \\ 0 \\ \frac{\pi}{3} \\ \frac{2\pi}{3} \\ \frac{\pi}{3} \\ \frac{4\pi}{3} \\ \frac{5\pi}{3} \\ \frac{2\pi}{3} \end{array} \right] \quad (3.29)$$

$$(V_{an_{rms}}(wt))^2 (2\pi) = \int_0^{2\pi} (V_{an})^2 (wt) dwt$$

$$\text{จะได้ } V_{an_{rms}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} V_{dc} \quad (3.30)$$

และจากอนุกรมฟูเรียร์ สามารถคำนวณค่า Fundamental ของ V_{an} และ V_{ab1} ได้

$$V_{an1}(wt) = \frac{4}{\pi} V_{dc} \sin wt \quad (3.31)$$

$$V_{ab1}(wt) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} V_{dc} \sin(wt + 30^\circ) \quad (3.32)$$

นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยการทำให้รีแอกทีฟเพาเวอร์ลดลง โดยการปรับเพิ่มมุมทริกซ์ให้มากขึ้น สามารถทำได้

$$\text{จาก } N_r = (1-S)N_s \quad (3.33)$$

$$\text{จะได้ว่า } N_{\min} = N_s \left(1 - \frac{n_s}{n_p} |\cos \alpha| \right) \quad (3.34)$$

ดังนั้น เรมจ์ของมุมทริกซ์จะอยู่ที่ $90^\circ \leq \alpha \leq \left| \arccos \left(\frac{n_s}{n_p} \right) \right|$ เมื่อมีค่า $S_{\max} = 1$

นอกจากนี้ ยังมีการต่อ Step Down Transformer เพื่อให้เกิดการสมดุลระหว่าง V_{dc} และ E_{av} เรมจ์ของมุมทริกซ์จะเปลี่ยนเป็น $90^\circ \leq \alpha \leq \left| \arccos \left(\frac{n_s n_{Tp}}{n_p n_{Ti}} \right) \right|$ จะมีค่า S_{\max} ที่ α ประมาณ 170 องศา โดยที่ $\frac{n_{Ti}}{n_{Tp}}$

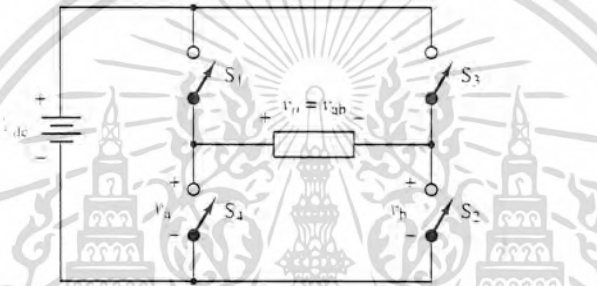
คือ Turn Ratio ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากแรงดันไฟ AC เอาท์พุทของ อินเวอร์เตอร์ และกระแสเอาท์พุท จะปรากฏในรูป Non-Sinusoidal และเกิด Harmonic แสดงในเทอมของ Total Harmonic Distortion ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุม Harmonic และแอมป์ลิจูด

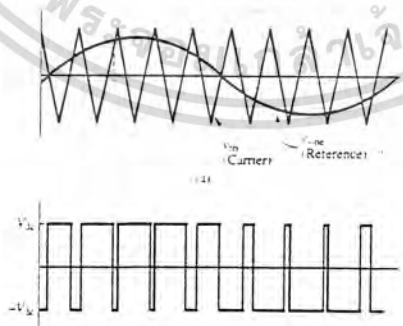
Pulse-Width Modulator Output จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดฮาร์โมนิกและควบคุมความถี่เพื่อการปรับปรุงคุณภาพแรงดันเอาท์พุท

อินพุทของ PWM เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal หรือ คลื่นแรงดันเฟส) และ สัญญาณ Carrier ซึ่งมีลักษณะเป็น Triangular Signal แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ Unipolar และ Bipolar PWM



รูปที่ 3.32 วงจรการทำงานของสวิตช์ประกอบการพิจารณาการทำงานของ PWM ทั้ง 2 แบบ

สำหรับ Bipolar PWM จะเป็นการเปรียบเทียบแรงดันคลื่นไซน์กับคลื่นรูปฟันเลื่อย โดยที่ค่าแรงดันเอาท์พุทจะเป็น $+V_{dc}$ เมื่อ $V_{sin} > V_{tri}$ และจะมีค่าเป็น $-V_{dc}$ เมื่อ $V_{sin} < V_{tri}$ แบ่งการทำงานของสวิตช์ออกเป็นคู่และผลัดเปลี่ยนกันทำงานทีละคู่ แสดงดังรูป 3.33



รูปที่ 3.33 Bipolar PWM Waveform of Output Voltage for Full Bridge Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

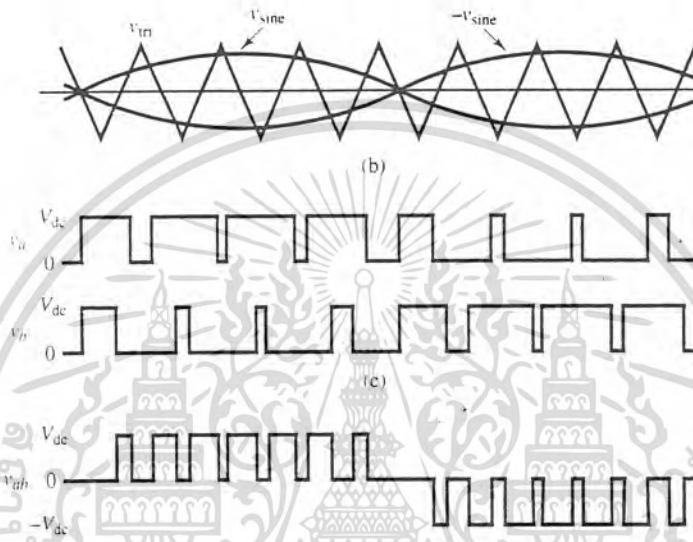
สำหรับ Unipolar PWM แม้จะมีสัญญาณอ้างอิง 2 ชุด (กลับเฟสกัน) แต่ก็มีหลักของการคิดค่าแรงดันเอาต์พุตเหมือนกับแบบแรก แต่สวิตช์แต่ละตัวจะแยกกันทำงานตามเงื่อนไขดังนี้

S_1 จะ On เมื่อ $V_{\text{sin}} > V_{\text{tri}}$

S_2 จะ On เมื่อ $-V_{\text{sin}} < V_{\text{tri}}$

S_3 จะ On เมื่อ $-V_{\text{sin}} > V_{\text{tri}}$

S_4 จะ On เมื่อ $V_{\text{sin}} < V_{\text{tri}}$



รูปที่ 3.34 Unipolar PWM Waveform of Output Voltage for Full Bridge Converter

วิธี PWM นี้ทำให้มี Low Order Harmonic ต่ำ ทำให้ Total Harmonic Distortion ต่ำ นิยมใช้ใน AC Drive Speed Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

Grid-connected DFIG driven by a wind turbine

4.1 บทนำ

DFIG ที่ต่อระบบเซอร์เบียดเพื่อให้เกิดการใช้งานที่มีกำลังงานสูงสุด โดยมีการจำกัดความเร็วรอบอยู่ในช่วงๆ หนึ่ง จะต้องมีการปรับ tracking ที่เหมาะสม วิธีการปรับมี 2 วิธี คือ current control mode หรือที่เรียกว่า indirect speed control และอีกวิธีหนึ่งคือ speed control mode หรือที่เรียกว่า direct speed control ถ้าความเร็วลมมีค่าเกินขอบเขตสูงสุดที่จำกัดไว้ พลังงานที่ได้จากกังหันลมจะถูกควบคุมให้คงที่

4.2 กำลังและแรงบิดที่ได้มาจากกังหันลม

กำลังทางกลในโรเตอร์ของกังหันลมจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน ความเร็ว (v), ความหนาแน่นของอากาศ (ρ), รัศมีของใบพัด (r) และตัวประกอบสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ในรูปของสมการดังนี้

$$P_m = \frac{\pi}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) r^2 v^3 \quad (4.1)$$

โดย β คือ pitch angle

λ คือ tip speed ratio โดยที่ค่า λ จะอยู่ในรูปฟังก์ชันของความเร็วรอบของกังหันลม (ω), รัศมีของใบพัดและความเร็วลม ดังสมการ

$$\lambda = \frac{\omega_t r}{v} \quad (4.2)$$

แรงบิดทางกลที่ได้มาจากลมจะแสดงอยู่ในเทอมของตัวประกอบสัมประสิทธิ์แรงบิด (C_t) ดังสมการ

$$T_{m,t} = \frac{P_m}{\omega_t} = \frac{\pi}{2} \rho C_t(\lambda, \beta) r^3 v^2 \quad (4.3)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับตัวประกอบสัมประสิทธิ์กำลังแสดงดังสมการ

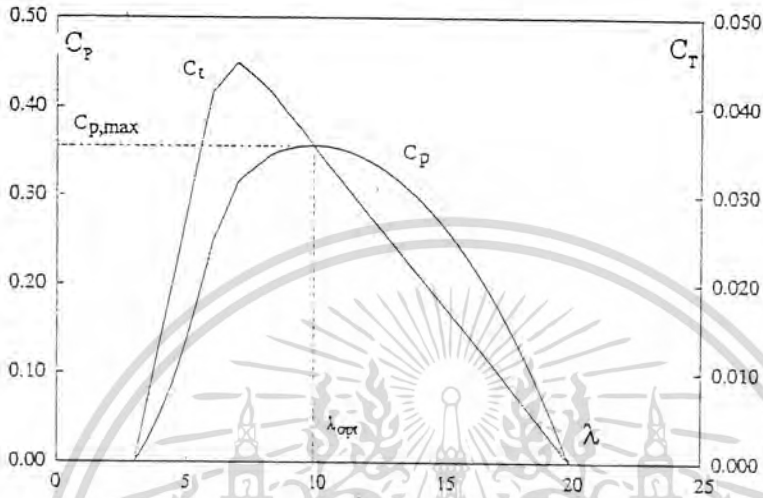
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_m}{\pi/2 \rho r^2 v^3}$$

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{\omega_t r}{v} C_t(\lambda, \beta)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_t(\lambda, \beta)$$

(4.4)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_t และ λ

รูปที่ 4.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบสัมประสิทธิ์ของกำลังงานจากกังหันลม, ของแรงบิด และ tip speed ratio สำหรับกังหันลมที่มีการกำหนดค่า β คงที่ จากรูปจะเห็นได้ว่าจุดที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด ($C_{p,max} = 0.35$) อยู่ที่ tip speed ratio = 10 ซึ่งค่ากำลังสูงสุดที่ได้คือ 7.5 kW ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที และรัศมีของใบพัด 3.24 เมตร

กำลังที่ได้มาจากกังหันลมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสามของความเร็วลม ดังนั้นพลังงานที่ได้มาจากลมจะลดลงเมื่อความเร็วลมลดลง โดยความเร็วลมต่ำสุดเรียกว่า ความเร็วลม cut-in

4.3 ขีดจำกัดของความเร็วในการทำงาน

จากแผนภาพที่ 4.1 ข้างต้น จุดใช้งานที่เหมาะสมซึ่งให้ค่ากำลังงานจากกังหันลมสูงสุดจะมีค่า $\lambda = \lambda_{opt}$ เครื่องจักรที่ใช้งานที่ tip speed ratio ที่เหมาะสมจะมีความสัมพันธ์ของกำลังงานทางกลดังสมการ

$$P_{opt} = \frac{\pi \rho C_{p,max} r^3}{2 \lambda_{opt}} \omega_t^3$$

(4.5)

$$P_{opt} = K_{opt} \omega_t^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีแรงบิดทางกลที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเท่ากับ $C_{p,max}$ ดังสมการ

$$T_{opt} = K_{opt} \omega_t^2 \quad (4.6)$$

ถ้าไม่พิจารณาความสูญเสียทางกลและที่เกิดในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ เครื่องจักรจะถูกใช้งานที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจะมีค่าพิทักกำลังทางสเตเตอร์, โรเตอร์ และแรงบิดทางไฟฟ้าดังสมการ

$$\begin{aligned} P_{s,rated} &= \frac{P_{m,rated}}{1-s} = K_{opt} \omega_s \omega_{rated}^2 \\ P_{r,rated} &= \frac{-sP_{m,rated}}{1-s} = -K_{opt} (\omega_s - \omega_{rated}) \omega_{rated}^2 \\ T_{rated} &= \frac{P_{m,rated}}{\omega_{rated}} = K_{opt} \omega_{rated}^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ ω_{rated} คือความเร็วรอบที่อ้างอิงเทียบกับด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยค่า ω_{rated} จะถูกกำหนดโดยการเลือกขดลวด เครื่องจักรสามารถให้แรงบิดพิทักที่ความเร็วรอบใดๆ อาจมีเหตุการณ์สองอย่างเกิดขึ้น

1) ถ้าเครื่องจักรทำงานที่ Subsynchronous จะต้องเลือกค่า ω_{rated} ที่เหมาะสมเพื่อจะได้เกิดความเร็วรอบตามที่ระบุในเนมเพลต ส่วนกำลังของคอนเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมโดยความเร็วรอบใช้งานต่ำสุด (แรงดันด้านโรเตอร์สูงสุด) และพิทักกระแสทางโรเตอร์

2) ถ้าใช้วงจรเซอร์เบียด ω_{rated} จะถูกตั้งค่าเพื่อปรับปรุงพิทักกำลังที่ Supersynchronous ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องจักรที่ขนาดเล็กได้

นอกจากนี้ สิ่งที่ใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกพิทักความเร็วรอบในวงจรเซอร์เบียดคือ อัตรากำลังของคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ ค่านี้จะถูกบังคับโดยแรงดันและกระแสที่คอนเวอร์เตอร์รับมา ถ้าไม่พิจารณาแรงดันตกคร่อมความต้านทานในสเตเตอร์และโรเตอร์ และการเหนี่ยวนำรั่วไหล จะมีค่าแรงดันด้านโรเตอร์ดังสมการ

$$V_r = \pm s \frac{V_s}{n} \quad (4.8)$$

โดยที่กระแสโรเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงบิดทางไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ λ_{opt} ซึ่งอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบของกังหันและความเร็วลมที่พิทัก สมมติว่าที่สภาวะคงตัว อ้างอิงสมการที่ 4.2 จะได้ว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega_{t,opt/v=10ms^{-1}}}{\omega_{t,opt/v=4ms^{-1}}} = 2.5 \quad (4.9)$$

ดังนั้นช่วงความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นสองความเร็วสถิตคือ สถิตที่กั้นหันทมเปลี่ยนแปลงพิกัดกำลัง (S_1) และสถิตที่ค่าความเร็วเหมาะสมค่าที่สุด (S_0) อัตราส่วนของความเร็วรอบจะตรงกับสถิตเหล่านี้ ดังสมการที่ 4.9 และ S_0, S_1 นิยามได้ดังสมการ

$$S_0 = \frac{\omega_s - \omega_0}{\omega_s} \quad (4.10)$$

$$S_1 = \frac{\omega_s - \omega_1}{\omega_s}$$

$$\omega_0 = \omega_{t,opt/v=4ms^{-1}}^{-1}$$

สำหรับ S_0

$$\omega_1 = \omega_{t,opt/v=10ms^{-1}}^{-1}$$

สำหรับ S_1

การกำหนดพิกัดกระแสของโรเตอร์เป็น 1 เปรอ์ยูนิต และแรงดันของโรเตอร์ที่ Standstill เป็น 1 เปรอ์ยูนิต ดังนั้นค่า VA ของคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์จะมีรูปสมการดังนี้

$$I_r (pu) = \frac{1}{1 - S_1}$$

$$V_r (pu) = S_0 \quad \text{ที่ minimum speed}$$

$$V_r (pu) = S_1 \quad \text{ที่ rated speed} \quad (4.11)$$

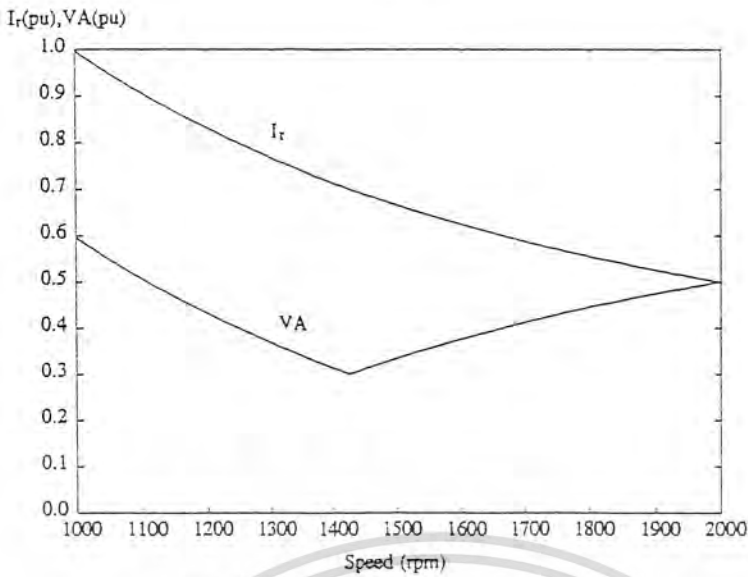
$$VA|_{s=S_0} = \frac{S_0}{1 - S_1}$$

$$VA|_{s=S_1} = \frac{S_1}{1 - S_1}$$

$$VA_{\max} (pu) = \max(\|VA|_{s=S_0}\|, \|VA|_{s=S_1}\|)$$

ดังนั้น แรงดัน-กระแส ในโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับารปรับตั้งพิกัดความเร็วรอบและช่วงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

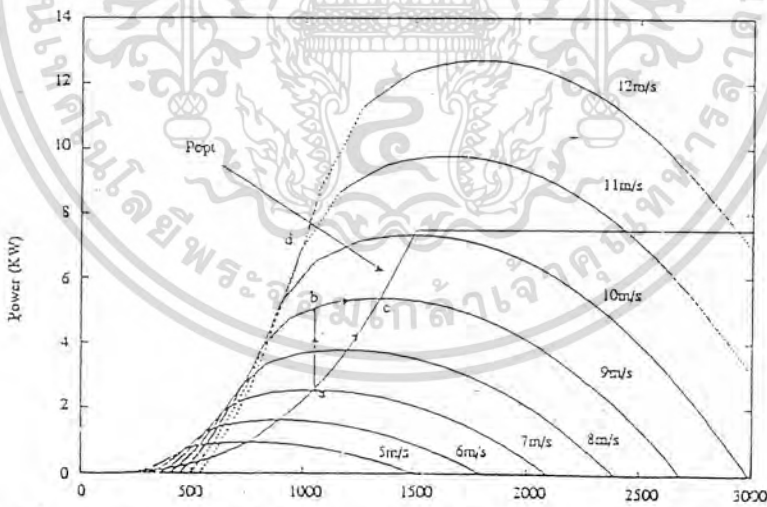
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 VA โรเตอร์ และ กระแส

จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า VA_{max} ทางโรเตอร์และกระแสด้านโรเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยรักษาพิคตแรงดันคงที่ และจากรูปข้างต้นนี้ ค่าค่าสุดของแรงดัน-กระแสที่ต้องการสำหรับคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์มีค่า $S = -0.41$

จากสมการที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังทางกลของกังหันกับความเร็วรอบ โดยมีความเร็วลมเป็นพารามิเตอร์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจากกังหันลมกับความเร็วรอบ

จากรูปแสดงให้เห็นถึงการดึงพลังงานสูงสุดจากลมในขณะที่ความเร็วรอบในการทำงานเปลี่ยนค่าไปโดยการควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อว่าคุณลักษณะของความเร็วรอบ และ P_{opt} จะเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วม ส่วนแรงบิดทางกลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (T_{mech}) เทียบกับความเร็วรอบ ณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วลมต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจะสังเกตได้ว่า จากความเร็วลมที่กำหนดจะมีความเร็วที่กำลังสูงสุดมากกว่าความเร็วที่แรงบิดสูงสุด

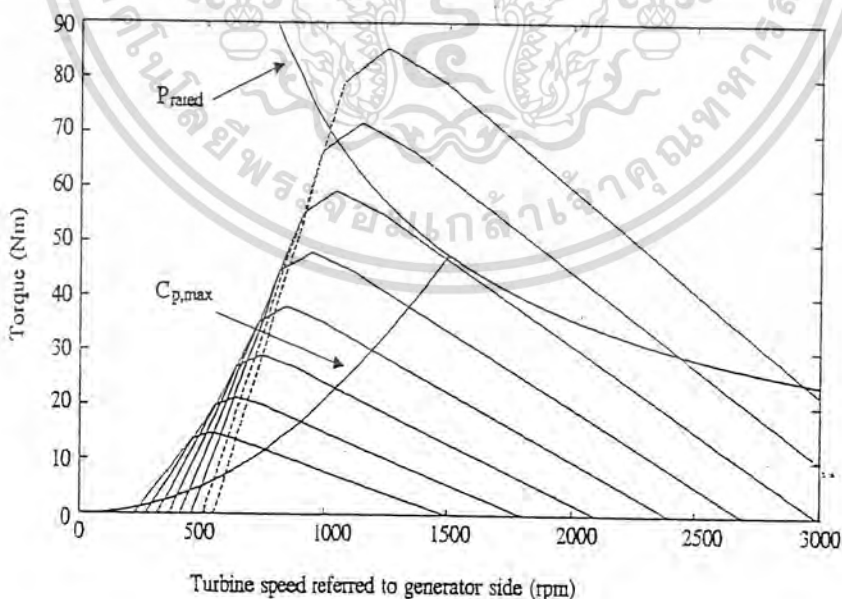
การควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามสมการที่ 4.6 จะทำให้แน่ใจว่า Tip speed ratio มีค่าเท่ากับค่าที่ดีที่สุด ในสถานะคงตัว มีวิธีการในการควบคุมค่านี้อยู่สองวิธี คือ ในกรณีที่ความเร็วลมต่ำกว่าพิคค (ส่วนนี้จะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 4.4) และในกรณีที่ความเร็วลมเกินกว่าพิคคจะมีการจำกัดพลังงาน โดยการ Pitch control

4.4 Optimum speed tracking

จากรูปที่ 4.3 มีวิธีที่เป็นไปได้สองวิธีที่ใช้ในการขับเครื่องจักรไฟฟ้า เพื่อเข้าสู่จุด Optimum ตามกราฟ power กับ turbine speed เมื่อกำหนดความเร็วมาให้

1) จากการวัดความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงบิดที่ถูกต้องจะได้จากสมการ 4.6 สำหรับจุด Optimum จะถูกบังคับที่เครื่องจักรไฟฟ้า ผ่านทางวงจร Vector Control เราเรียกรูปนี้ว่า Indirect Speed Control (ISC)

2) จากสัญญาณแรงบิดของเครื่องจักรไฟฟ้า จะได้ความเร็วจากคุณสมบัติของ แรงบิดทาง กลกับความเร็วของกังหัน ขณะกังหันทำงานที่ $C_{p,max}$ ความเร็วนี้จะเป็นความเร็วอ้างอิงในการขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้า และจำเป็นต้องมีการสังเกตหรือวัดค่าแรงบิดทางกลด้วย เราเรียกรูปนี้ว่า Direct Speed Control (DSC)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดจากกังหันลมกับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 Indirect Speed Control (ISC)

วิธีนี้จะยกตัวอย่างได้ดังนี้ เริ่มจากกังหันลมทำงานที่สภาวะคงที่ที่ Optimum Speed ด้วยความเร็วลม 7 ms⁻¹ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานที่จุด “a” เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 9 ms⁻¹ ความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าจะยังคงที่อยู่ช่วงหนึ่ง แต่กำลังทางกลจะเพิ่มขึ้นไปสู่จุด “b” พร้อมด้วยแรงบิดทางกลที่เพิ่มขึ้น เครื่องจักรไฟฟ้าจะมีความเร่งเกิดขึ้น ขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การควบคุมจะกำหนดแรงบิดทางไฟฟ้าบน DFIG ตามสมการ (1) หลังจากที่มีการชดเชย Transmission Friction Losses

ถ้าให้ $T_e^* = T_e$ ดังนั้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e^* - B\omega$$

ซึ่ง B คือค่าประมาณของ torque friction coefficient โดยการปรับตั้งค่า T_e^* ดังนี้

$$T_e^* = K_{opt} \omega^2 - B\omega$$

ดังนั้น

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_{opt} \omega^2$$

สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงบิดเท่ากับผลต่างระหว่าง แรงบิดทางกลของกังหัน กับ แรงบิดที่ $C_{p,max}$ จนในที่สุดเครื่องจักรไฟฟ้าจะถึงจุด “c” ที่ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงบิดเป็นศูนย์ จะได้ Reference Torque Current (i_{qr}^*) จากสมการ

$$i_{qr}^* = \frac{2T_e^*}{3pL_m i_{ms}}$$

ในสถานะการณที่คล้ายกัน ถ้าความเร็วลมลดลงจาก 9 เป็น 7 ms⁻¹ กำลังที่ได้จากกังหันลมจะลดลง Shaft Speed จะยังคงที่ในช่วงหนึ่ง แต่แรงบิดทางกลจะลดลง ณ จุดนี้กำลังที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมากกว่าที่ออกจากกังหัน และเครื่องจักรไฟฟ้าจะลดความเร็วลง ด้วยการควบคุม i_{qr}^* การลดลงของแรงบิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำกับผลต่างระหว่าง แรงบิดจากกึ่งहनลม กับแรงบิดจากสมการที่ (1) ขณะสถานะ Transient กำลังจะถูกดึงมาจากความเฉื่อยของระบบจนกระทั่งกั้นเข้าสู่จุดสมดุลใหม่ “a”

4.4.2 Direct Speed Control (DSC)

ในการพิจารณานั้นมีเป้าหมายคือ Tracking Optimum λ_{opt} สามารถเขียนความสัมพันธ์สำหรับความเร็วทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\omega^* = \frac{\lambda_{opt}}{r} v$$

ถ้ารู้ความเร็วลม v ก็จะได้ Reference Speed ω^* ความเร็วที่ต้องการนี้จะถูกเปรียบเทียบกับความเร็วที่แท้จริง และผลลัพธ์ของ Speed Controller เพื่อใช้ในการปรับแรงบิดทางไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้ารู้แรงบิดทางกลที่ได้จากกั้นहनลม ก็ไม่จำเป็นต้องวัดความเร็วลมโดยหาได้จากสมการ

$$\omega^* = \sqrt{\frac{T_m}{K_{opt}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การออกแบบและการควบคุม

5.1 โมเดลของ Front-end converter

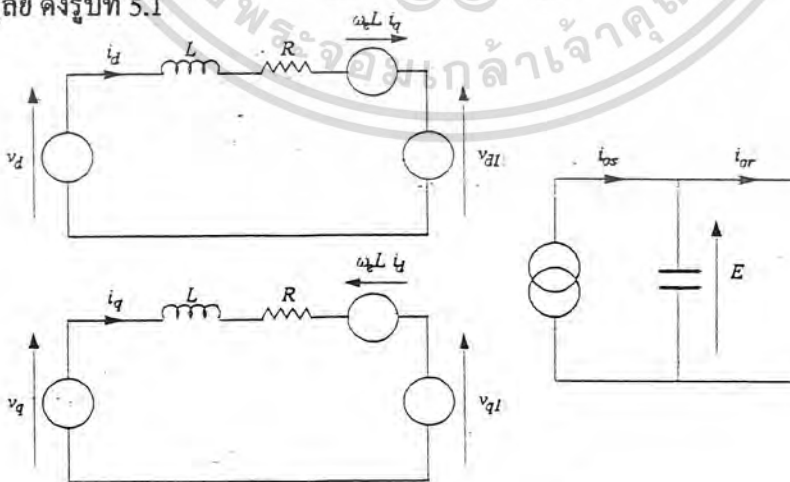
จากรูป 3.11 จะสมมติให้เป็น idel commutation และไม่คำนึงผลจากกระแสฮาร์โมนิก สมการโมเดลของ front-end converter จะได้คั้งสมการ (5.1) โดยให้ V_{a1} , V_{b1} และ V_{c1} เป็น fundamental voltage ต่อเฟส ซึ่งเป็นอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

ใช้การแปลงในภาคผนวก ข แปลงสมการ (5.1) ไปเป็นแกนอ้างอิง d-q ที่หมุนด้วยความเร็วซินโครนัส (SYNCHRONOUS ROTATING (ความเร็วเชิงมุม ω) d-q REFERENCE FRAME) จะได้

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{d1} \\ v_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e Li_d + v_{q1} \end{aligned} \quad (5.2)$$

จะได้วงจรสมมูลย์ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลย์ของ front-end converter ใน d-q coordinates

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาคผนวก ข , i_{os} หาได้โดย

$$i_{os} = 3 \frac{i_d v_{d1} + i_q v_{q1}}{E} \quad (5.3)$$

แอกทีฟเพาเวอร์ (P) และรีแอกทีฟเพาเวอร์ (Q)

$$\begin{aligned} P &= 3(v_d i_d + v_q i_q) \\ Q &= 3(v_d i_q - v_q i_d) \end{aligned} \quad (5.4)$$

ถ้าแกน d ของเฟรมอ้างอิงมีทิศทางเดียวกับ stator vector position $v_q = 0$ และเนื่องจากขนาดของแรงดันที่จ่ายให้ระบบมีค่าคงที่ จึงทำให้ v_d มีค่าคงที่ด้วย จากสมการที่ (5.4) จึงเห็นได้ว่า แอกทีฟและรีแอกทีฟเพาเวอร์ที่ไหลจากแหล่งจ่ายไปยัง front-end converter จะเป็นสัดส่วนกับ i_d และ i_q ตามลำดับ

เพื่อคำนวณ supply voltage vector position (θ_v), แรงดัน 3 เฟสถูกแปลงไปเป็นแกนหมุนนิ่ง 2 แกน (α, β) ดังที่อธิบายในภาคผนวก ข

$$\begin{aligned} \theta_v &= \arctan \frac{v_\beta}{v_\alpha} \\ \omega_s &= \frac{d\theta_v}{dt} \end{aligned} \quad (5.5)$$

v_α, v_β เป็นแรงดันสเตรเตอร์ตามแกน α, β โดยไม่คำนึงถึงค่าความสูญเสียใน filter resistance และ DC-link (DC-link) (i.e. $v_{d1} = v_d$ และ $v_{q1} = v_q = 0$) นำมาเขียนความสัมพันธ์ได้

$$\begin{aligned} E i_{os} &= 3 v_d i_d \\ m_1 &= \frac{2\sqrt{2} v_d}{E} \\ i_{os} &= \frac{3}{2\sqrt{2}} m_1 i_d \\ C \frac{dE}{dt} &= i_{os} - i_{or} \end{aligned} \quad (5.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m_1 เป็น PWM modulation index สำหรับ front-end convertor. จากสมการที่ 5.6 แรงดัน DC-link จะถูกควบคุมโดย i_d (เพื่อให้พลังงานที่เหมาะสม) โครงสร้างที่ใช้ควบคุมมีประโยชน์ในการควบคุมกระแส (i_d และ i_q), i_d ที่ต้องการมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน DC-link ที่ผ่าน PI controller (ความต้องการ i_d จะกำหนด displacement factor ของกระแสจากแหล่งจ่าย) รูปแบบของระบบที่สมบูรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.6

5.2 การออกแบบลูปควบคุม (CONTROL LOOP DESIGN)

จากสมการ 5.2 ถ้าให้ d-axis มีทิศทางเดียวกับตำแหน่งเวกเตอร์ (vector position) ของแรงดันแหล่งจ่าย

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{d1} \\ 0 &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega_e Li_d + v_{q1} \end{aligned} \quad (5.7)$$

เพื่อที่จะ decoupling สมการประกอบแกน d และ q

$$\begin{aligned} v_{d1} &= -v_d + (\omega_e Li_q + v_d) \\ v_{q1} &= -v_q - (\omega_e Li_d) \end{aligned} \quad (5.8)$$

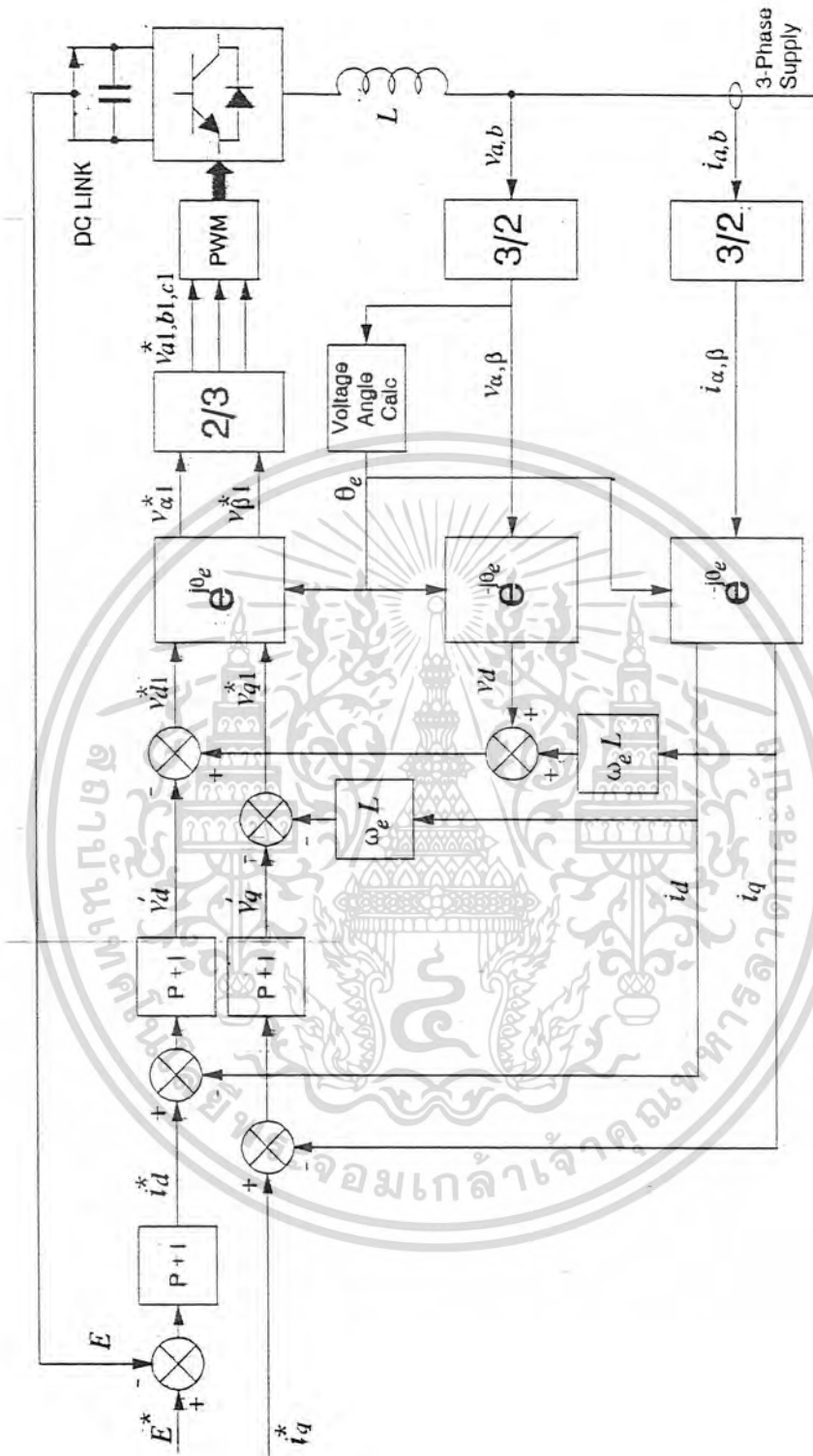
กำหนดให้

$$\begin{aligned} v'_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} \\ v'_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (5.9)$$

หรือ

$$F(s) = \frac{i_d(s)}{v'_d(s)} = \frac{i_q(s)}{v'_q(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของการควบคุมเวกเตอร์สำหรับ front-end converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะใช้ PI control loop หาค่า v_d^* และ v_q^* ที่ต้องการ โดย v_{d1}^* และ v_{q1}^* มาจาก

$$\begin{aligned} v_{d1}^* &= -v_d + (\omega_e Li_q + v_d) \\ v_{q1}^* &= -v_q - (\omega_e Li_d) \end{aligned} \quad (5.11)$$

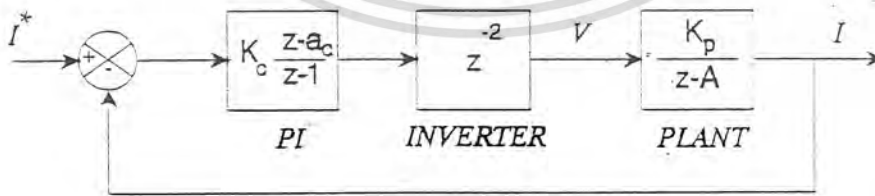
ซึ่งถูกแปลงมาเพื่อใช้สร้าง 3 เฟส มอดูเลชัน (v_{a1}^* , v_{b1}^* และ v_{c1}^* ในรูปที่ 5.6) สำหรับใช้กับเครื่องสร้าง PWM สำหรับ line inductor ที่มีค่า 12 mH/phase จะเป็นตัวลิมิต ripple harmonic ในช่วงสวิตชิ่งไม่ให้เกิน 3 แอมแปร์ จากยอดถึงยอด (peak to peak) (ประมาณ 15% ของกระแสยอดที่พิกัด)

5.2.1 การออกแบบตัวควบคุมกระแส (CURRENT LOOP CONTROLLER DESIGN)

การออกแบบ PI current controller จะเป็นไปตามสมการ 5.10 กำหนดให้ตัวชดเชยมีค่าคงที่ ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการคำนวณ จากสมการ 5.10

$$\begin{aligned} F(z) &= \frac{K_p}{z-A} \\ A &= e^{-(R/LT_s)} \\ K_p &= \frac{1-A}{R} \end{aligned} \quad (5.12)$$

โดย T_s (sampling time) มีค่าเท่ากับ 0.5 ซึ่งจะกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ช้อยออกไป 2 คาบของเวลาการสุ่ม (sampling time) เพื่อนำไปใช้กับกระบวนการสร้าง PWM และควบคุมเวลาของกระบวนการ ซึ่งจะแสดงการควบคุมดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปควบคุมกระแสของ front-end converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่ I อาจหมายถึง i_u หรือ i_q และ V อาจหมายถึง v_u หรือ v_q ตามลำดับ ดังแสดงไว้ดังบล็อกไดอะแกรม ในรูปที่ 5.3 สำหรับอินดักชันมอเตอร์ที่ใช้ $R=0.1m\Omega$, $L=12mH$, nominal close loop natural = 123 Hz และ ζ (damping ratio) = 0.8 จากข้อกำหนดข้างบน จะได้ ตัวควบคุมกระแส (current controller) ที่มาจาก

$$4.72 \frac{(z-0.96)}{(z-1)}$$

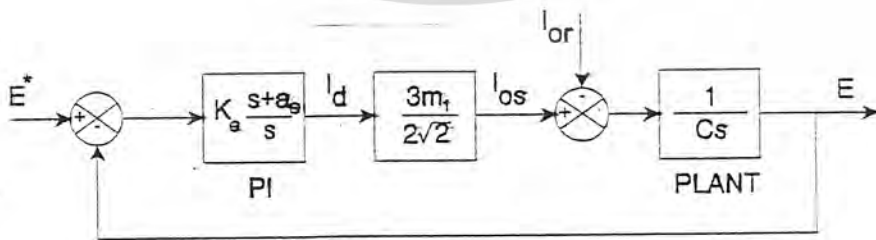
รากของสมการหลัก(domain root) อยู่ที่ $z = 0.712 \pm 0.167i$ รากสมการที่เหลืออยู่ที่ $z = 0.984$ และ $z = -0.374$ ตามลำดับ

5.2.2 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันDC-link

การออกแบบแรงดันDC-linkจะกำหนดให้ nominal closed loop natural frequency น้อยกว่า sampling frequency อย่างน้อย 20 เท่า จากสมการ(5.6)จะได้ transfer function ของอุปกรณ์ในระบบ

$$\frac{E(s)}{I_d(s)} = \frac{3m_t}{2\sqrt{2}Cs} \tag{5.13}$$

บล็อกไดอะแกรมรูปปิดของส่วนควบคุมแรงดันDC-linkแสดงดังรูปที่ 5.4 โดย i_{os} หมายถึง สัญญาณรบกวน (disturbance)



รูปที่ 5.4 ฎลควบคุมแรงดันDC-link

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.4 สมการลักษณะ (characteristic equation) ของตัวควบคุมแรงดัน DC-link คือ

$$s^2 + \frac{3m_1 K_e s}{2\sqrt{2}C} + \frac{3K_e a_e m_1}{2\sqrt{2}C} = 0 \quad (5.14)$$

พารามิเตอร์ของส่วนควบคุม (controller parameter) เท่ากับ

$$K_e = \frac{4\sqrt{2}C\zeta\omega_n}{3m_1} \quad (5.15)$$

$$a_e = \frac{2\sqrt{2}\omega_n^2}{3m_1 K_e}$$

ω_n และ ζ หมายถึง ความถี่ธรรมชาติลูปปิด และ damping ratio ของลูปควบคุมแรงดัน DC-link สำหรับการทดลอง แรงดัน DC-link จะกำหนดไว้ที่ 550V ซึ่งจะได้รับจากแหล่งจ่ายแรงดัน 250 V line-to-line , modulation index (m_1) เท่ากับ 0.75 คาปาซิเตอร์ที่ แรงดันเชื่อม โยง เท่ากับ 2400 μF ความถี่ธรรมชาติของลูปปิด (close loop natural frequency) เท่ากับ 125 rad/s ซึ่งจะช้า กว่าความถี่ธรรมชาติของส่วนควบคุมกระแส (current controller natural frequency) ประมาณ 30 เท่า damping ratio ($\zeta = 0.707$) จากข้อกำหนดข้างต้น พารามิเตอร์สำหรับ PI controller ของ แรงดัน DC-link คือ

$$K_e = 0.173 \quad a_e = 28.28$$

เวลาการลู่ของลูปปิดของแรงดัน DC-link ตั้งไว้ที่ 5 ms

5.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ Field ในการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำ (The Field Orientation Principle in Control of induction machines)

5.3.1 การแปลงเครื่องจักรเหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปของเครื่องจักรเบื้องต้น

1) ลักษณะทางกายภาพ

การจะแปลงให้อยู่ในรูปของเครื่องจักรเบื้องต้นเพื่อการเทียบเคียงนั้น จะมีการทำอยู่ 2 ขั้นตอนคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 1 ค่าแรงดัน และกระแสทั้ง 3 เฟส จะถูกแปลงค่าให้อยู่ในรูปของ 2 เฟส ค่าความถี่สลับที่โรเตอร์ และค่าความถี่จากแหล่งจ่ายไฟที่สเตเตอร์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ขั้นที่ 2 ไม่มีการแปลงค่าและแปลงรูปของวงจรสเตเตอร์ แต่สำหรับวงจร โรเตอร์จะต้องแปลงค่าจากแกนอ้างอิง 2 เฟสของโรเตอร์ ให้ไปเป็นแกนอ้างอิง 2 เฟสของสเตเตอร์

หลังจากที่ได้มีการแปลงค่าต่างๆแล้วค่ากระแสต่างๆในขดลวดจะอยู่ในรูปของความถี่จากแหล่งจ่ายไฟที่ทั้งหมด ลักษณะของสนามแม่เหล็กจะมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งเกิดจากกระแส 3 เฟสที่สมมาตรกันในสเตเตอร์หรือจากขดลวด 2 เฟสที่สมดุลกันของกระแสสเตเตอร์ในเครื่องจักรเบื้องต้น กระแสที่ถูกเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์จะสมดุลกันและสร้างสนามแม่เหล็กหมุนตามเข็มนาฬิกาเช่นกัน

ลำดับการจัดเรียงเฟสบนสเตเตอร์จะเลือกเรียงตามลำดับ $a-b-c$ ซึ่งหมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งสอดคล้องตามค่าแรงดันลำดับเฟสเป็นบวกที่ป้อนแก่ขดลวดทางสเตเตอร์

2) การแปลงค่าต่างๆทางค่าน สเตเตอร์ และ โรเตอร์

ค่าสัดส่วนของรอบสำหรับวงจร 3 เฟสซึ่งหุคหนึ่งมาเป็นวงจร 2 เฟสซึ่งหุคหนึ่ง และค่าการแปลงที่ยังเคลื่อนที่ คือ $\sqrt{2/3}$ และวงจรขดลวด 3 เฟสจะเรียงตามเข็มนาฬิกา $a-b-c$

2.1) การแปลงค่าทางสเตเตอร์ ไม่มีการเปลี่ยนมิติอ้างอิงสำหรับวงจร 3 เฟสมาเป็น 2 เฟสทั้งนี้ เพราะขดลวดที่สเตเตอร์ไม่มีการหมุน

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_\Gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

จัดในรูปเมตริกซ์อย่างง่าย

$$[i_{DQ\Gamma}] = [B][i_{ABC}] \quad \text{กระแสที่หุคหนึ่งอยู่กับที่} \quad (5.17)$$

แน่นอนว่าความสัมพันธ์ทางด้านแรงดันก็คล้ายคลึงกัน

$$[v_{DQR}] = [B][v_{ABC}] \quad \text{แรงดันที่หุคหนึ่งอยู่กับที่} \quad (5.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[\bar{B}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

2.2) การแปลงค่าทางโรเตอร์ การแปลงค่าสำหรับวงจร 3 เฟสมาเป็นวงจร 2 เฟส ชั้นแรกยังไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนมิติอ้างอิง เพราะคงสมมติให้ขดลวด 1 เฟสนี้หมุนไปด้วย มีการเปลี่ยนความถี่ให้เท่ากับสเคเตอร์

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

จัดในรูปแบบเมทริกซ์แบบง่าย

$$[i_{\alpha\beta\gamma}] = [\bar{B}] [i_{abc}] \quad (5.21)$$

$$\text{หรือ } i_\alpha = \frac{3}{2} \cdot i_a$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_b - i_c)$$

$$[v_{\alpha\beta\gamma}] = [\bar{B}] \cdot [v_{abc}]$$

$$\text{หรือ } v_\alpha = \sqrt{3} \cdot v_{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot v_{bc}$$

$$v_\beta = \frac{3}{2} \cdot v_{bc}$$

การแปลงค่าจาก (α, β, γ) มาเป็น (d, q, r) อันนี้จำเป็นต้องเปลี่ยนมิติอ้างอิง คือ จากมิติของโรเตอร์ ซึ่งหมุนอยู่มาเป็นมิติที่หยุดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_r t) & \sin(\omega_r t) & 0 \\ -\sin(\omega_r t) & \cos(\omega_r t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

หรือสำหรับกระแสจะได้

$$i_d = \frac{1}{k} \cdot (i_\alpha \cdot \cos(\omega_r t) - i_\beta \cdot \sin(\omega_r t)) \quad (5.23)$$

$$i_q = \frac{1}{k} \cdot (i_\beta \cdot \cos(\omega_r t) + i_\alpha \cdot \sin(\omega_r t)) \quad (5.24)$$

$$k = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{6} \quad \text{สำหรับการต่อแบบเคลด้า}$$

$$k = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \quad \text{สำหรับการต่อแบบสตาร์}$$

หรือสำหรับโวลต์เตจจะได้เหมือนกันคือ

$$v_d = \frac{1}{k} \cdot (v_\alpha \cdot \cos(\omega_r t) - v_\beta \cdot \sin(\omega_r t)) \quad (5.25)$$

$$v_q = \frac{1}{k} \cdot (v_\beta \cdot \cos(\omega_r t) + v_\alpha \cdot \sin(\omega_r t)) \quad (5.26)$$

$$k = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \quad \text{สำหรับการต่อแบบเคลด้า}$$

$$k = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{6} \quad \text{สำหรับการต่อแบบสตาร์}$$

จัดในรูปเมตริกซ์แบบง่าย

$$\begin{bmatrix} i_{dqr} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta\gamma} \end{bmatrix}$$

รวมสมการ (3.17) และ (3.19) จะได้

$$\begin{bmatrix} i_{dqr} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix}$$

$$\text{หรือ} \begin{bmatrix} i_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

สำหรับสมการแรงดันก็มีลักษณะคล้ายกัน

$$\begin{bmatrix} v_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{abc} \end{bmatrix}$$

$$\text{เมื่อ} \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[\bar{C}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega_r t & \cos(\omega_r t + 120^\circ) & \cos(\omega_r t - 120^\circ) \\ -\sin \omega_r t & -\sin(\omega_r t + 120^\circ) & -\sin(\omega_r t - 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

ได้การแปลงแบบข่อๆคือ

ทางสเตเตอร์ $[i_{DQR}] = [\bar{B}][i_{ABC}] \quad (5.30)$

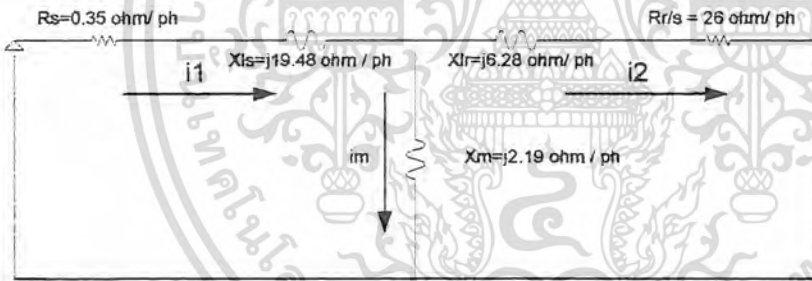
$$[v_{DQR}] = [\bar{B}][v_{ABC}] \quad (5.31)$$

ทางโรเตอร์ $[i_{dqr}] = [\bar{C}][i_{abc}] \quad (5.32)$

$$[v_{dqr}] = [\bar{C}][v_{abc}] \quad (5.33)$$

การแปลงค่าเหล่านี้ ปกติจะใช้กับค่าแรงดัน และกระแสแบบชั่วขณะเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจจะจำเป็นต้องเป็นรูปคลื่นไซน์

5.4 การแปลงค่าต่างๆในเครื่องจักรเหนี่ยวนำซึ่งใช้ใน Project 'simulation of wind turbine'



รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การแปลงค่าต่างๆจะอาศัยวงจร สมมูลย์ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำเป็นหลักดังนี้คือ

5.4.1 ความสัมพันธ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนอ้างอิงของสเตเตอร์

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s s & -\omega_s L_s & L_o s & -\omega_s L_o \\ \omega_s L_s & R_s + L_s s & \omega_s L_s & L_o s \\ L_o s & -\omega_{slip} L_o & R_r + L_r s & -\omega_{slip} L_r \\ \omega_{slip} L_o & L_o & \omega_{slip} L_r & R_r + L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

ความสัมพันธ์ของแกน(d-q) ในสเตเตอร์กับโรเตอร์ฟลักซ์ เอกสารเขียนแบบนี้เพราะมันง่ายต่อการเข้าใจมากกว่าเขียนแบบอื่น ไม่นอนดูตให้เข้าใจไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_o i_{dr} \quad (5.35)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_o i_{qr} \quad (5.36)$$

$$\lambda_{dr} = L_o i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (5.37)$$

$$\lambda_{qr} = L_o i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (5.38)$$

ดังนั้นจะ ได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางไฟฟ้าเท่ากับ

$$T_e = 3 \cdot \frac{p}{2} \cdot L_o (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$

$$\lambda_{qs} = 0$$

$$i_{qs} = -\frac{L_o}{L_s} \cdot i_{qr} \quad (5.39)$$

$$|\lambda_s| = \lambda_{ds} = L_o i_{ms}$$

$$i_{ms} = \frac{L_s}{L_o} i_{ds} + i_{dr}$$

และจะ ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด กับ ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในแกน (d-q) ดังนี้

$$V_{ds} = R_s i_{ds}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s L_o i_{ms}$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \delta L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{slip} \delta L_r i_{qr}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \delta L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_{slip} (L_m i_{ms} + \delta L_r i_{dr}) \quad (5.40)$$

$$T_e = -3 \frac{p}{2} L_m i_{ms} i_{qr}$$

$$\delta = 1 - \frac{L_o^2}{L_s L_r}$$

$$L_m = \frac{L_o^2}{L_s}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^s \\ \lambda_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s^s \\ i_r^s \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{\beta_s} = \int (v_{\beta_s} - R_s \cdot i_{\beta_s}) dt$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta_s}}{\lambda_{\alpha_s}} \right) \quad (5.41)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds}^s \\ \lambda_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) \\ \sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha_s} \\ \lambda_{\beta_s} \end{bmatrix}$$

$$i_{ms} = \lambda_{ds}^s \cdot \frac{1}{L_o}$$

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแอกทีฟเพาเวอร์ และรีแอกทีฟเพาเวอร์ของมอเตอร์มีความสัมพันธ์กับค่ากระแส i_{qs} และ i_{ds} ตามลำดับ โดยแอกทีฟเพาเวอร์ (i_{qs}) จะมีหน้าที่ในการสร้างแรงบิด และรีแอกทีฟเพาเวอร์ (i_{ds}) ซึ่งจะทำให้หน้าที่ในการฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนี้

$$P_s = 3v_{qs}i_{qs} = -3 \frac{L_o}{L_s} v_{qs}i_{qr} \quad (5.42)$$

$$Q_s = -3v_{qs}i_{ds} = -3 \frac{L_o}{L_s} v_{qs}(i_{ms} - i_{dr})$$

ความสัมพันธ์ของการไหลของพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

$$P_s = 3(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \quad (5.43)$$

$$P_r = 3(v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr})$$

ถ้าไม่คิดการสูญเสียทางกลและทางไฟฟ้าจะ ได้ความสัมพันธ์ของพลังงานดังนี้

$$P_s = -3\omega_s L_m i_{ms} i_{qr}$$

$$P_r = 3\omega_{slip} L_m i_{ms} i_{qr} \quad (5.44)$$

$$P_m = -3\omega_r L_m i_{ms} i_{qr}$$

และจะ ได้ความสัมพันธ์ของพลังงานกับค่าสลลิปดังนี้

$$\frac{P_s}{P_m} = \frac{1}{1-s}$$

$$\frac{P_r}{P_m} = \frac{-s}{1-s}$$

$$\frac{P_r}{P_m} = \frac{-s}{1-s}$$

$$\frac{P_m}{P_m} = \frac{1-s}{1-s}$$

(5.45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_r}{P_m} = -s$$

ซึ่งจะทำให้สามารถปรับความเร็วรอบของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ทั้งช่วง supersynchronous speed ($-1 < s < 0$) และช่วง subsynchronous speed ($0 < s < 1$) เครื่องจักรเหนี่ยวนำ สามารถมี supersynchronous speed ($-1 < s < 0$) ก็ต่อเมื่อมีการสร้างพลังงานมากกว่าพลังงานที่พิกัด

5.4.2 ความสัมพันธ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนอ้างอิงของโรเตอร์

การแปลงค่าทางด้านโรเตอร์เป็นดังนี้

$$\theta_{slip} = \theta_s - \theta_r$$

$$\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$$

$$\omega_{slip} = \frac{d(\theta_{slip})}{dt}$$

$$\omega_s = \frac{d(\theta_s)}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d(\theta_r)}{dt}$$

(5.46)

$$\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{2}{3\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(\omega_{slip} \cdot t) & -\sin(\omega_{slip} \cdot t) \\ \sin(\omega_{slip} \cdot t) & \cos(\omega_{slip} \cdot t) \end{bmatrix}$$

$$V'_{dr} = R_r \cdot i'_{dr} + \delta L_r \frac{d(i'_{dr})}{dt} \quad (i'_{dr} = \text{ผลต่างของ } i^*_{dr} \text{ กับ } i_{dr})$$

$$V'_{qr} = R_r \cdot i'_{qr} + \delta L_r \frac{d(i'_{qr})}{dt} \quad (i'_{qr} = \text{ผลต่างของ } i^*_{qr} \text{ กับ } i_{qr})$$

$$V_{dr} = V'_{dr} - \omega_{slip} \cdot \delta L_r \cdot i_{qr}$$

(3.43)

$$V_{qr} = V'_{qr} + \omega_{slip} \cdot (L_m \cdot i_{ms} + \delta L_r \cdot i_{dr})$$

$$V^*_{dr} = V'_{dr} - \omega_{slip} \cdot \delta L_r \cdot i_{qr}$$

$$V^*_{qr} = V'_{qr} + \omega_{slip} \cdot (L_m \cdot i_{ms} + \delta L_r \cdot i_{dr})$$

$$\begin{bmatrix} V^*_{\alpha r} \\ V^*_{\beta r} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{6} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_{slip} t) & \sin(\omega_{slip} \cdot t) \\ -\sin(\omega_{slip} \cdot t) & \cos(\omega_{slip} \cdot t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^*_{dr} \\ V^*_{qr} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าต่างๆของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

1) การแปลงค่าทางด้านสเตเตอร์

ขั้นที่ 1 คำนวณค่า อิมพีแดนซ์โดยรวมของ เครื่องจักรเหนี่ยวนำจาก วงจรสมมูลย์ ซึ่งมีการส่งผ่านมาทางด้าน สเตเตอร์ ดังนี้คือ

$$\bar{Z} = 0.35 + j(19.48) + \frac{j(2.19) \cdot (26 + j(6.28))}{j(2.19) + 26 + j(6.28)} = 0.517 + j(21.62) = 21.63 \angle 88.63^\circ \quad \Omega / ph$$

$$\bar{V}_s = \frac{415}{\sqrt{3}} = 239.6 \text{ v / ph}$$

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}} = \frac{239.6}{21.63 \angle 88.63^\circ} = 0.265 + j(-11.08) = 11.083 \angle -88.63^\circ \quad A / ph$$

$$\bar{I}_r = -\bar{I}_s \times \frac{j(2.19)}{j(2.19) + 26 + j(6.28)} = -\bar{I}_s \times (0.025 + j(0.076)) = -\bar{I}_s \times 0.08 \angle 71.79^\circ \quad A / ph$$

$$\bar{I}_r = -11.083 \angle -88.63^\circ \times 0.08 \angle 71.79^\circ = -0.849 + j(0.257) = 0.887 \angle -16.84^\circ \quad A / ph$$

$$T = \frac{3}{2} \times p \times L_m \times (I_m \cdot \bar{I}_s \cdot \bar{I}_r^*) = \frac{3}{2} \times 6 \times 0.007 \times (11.083 \angle -88.63^\circ \times 0.887 \angle 16.84^\circ) \quad N / m$$

เพราะฉะนั้นจะสามารถคำนวณกระแสเฟส abc ได้ดังนี้

$$i_{as} = \sqrt{2} \times 11.083 \times \cos(314.16 \cdot t - 88.63^\circ) \quad A / ph$$

$$i_{bs} = \sqrt{2} \times 11.083 \times \cos(314.16 \cdot t - 88.63^\circ - 120^\circ) \quad A / ph$$

$$i_{cs} = \sqrt{2} \times 11.083 \times \cos(314.16 \cdot t - 88.63^\circ - 240^\circ) \quad A / ph$$

ในการใช้งานใน Program matlab and simulink จะต้องมีการเปลี่ยนมุมให้อยู่ในรูป Radian โดยนำ $\frac{\pi}{180}$ คูณ

เข้าไป

สามารถแปลงแกนอ้างอิงของกระแสทางด้านสเตเตอร์ของ (abc) มาเป็นแกน ($\alpha\beta$) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

$$i_{\alpha s} = i_{as} - \frac{1}{2} \cdot i_{bs} - \frac{1}{2} \cdot i_{cs}$$

$$i_{\beta s} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{bs} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{cs}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ต่อไปจะเป็นการพิจารณา ค่าแรงดัน ไฟฟ้า ทางด้านสเตเตอร์ (V_{abc})
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_a = 239.6 \times \cos(\omega_s t) \quad V / ph$$

$$V_b = 239.6 \times \cos(\omega_s t - 120^\circ) \quad V / ph$$

$$V_c = 239.6 \times \cos(\omega_s t - 240^\circ) \quad V / ph$$

ในการใช้งานใน Program matlab and simulink จะต้องมีการเปลี่ยนมุมให้อยู่ในรูป Radian โดยนำ $\frac{\pi}{180}$ คูณ

เข้าไปเช่นเดียวกับค่ากระแส

2) การแปลงค่าทางด้านโรเตอร์

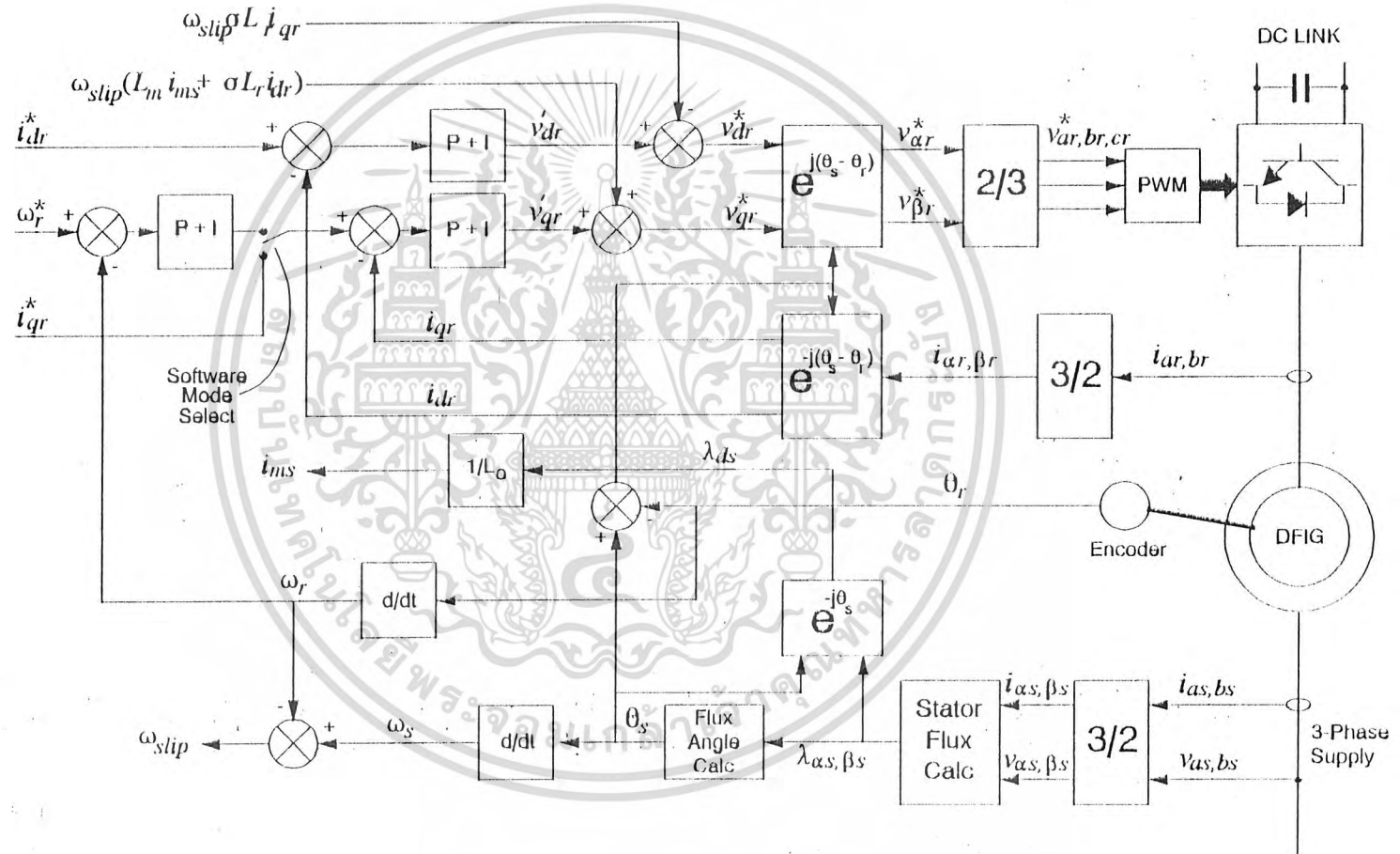
$$\begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = I_{dm} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s - \omega_r)t + k \\ \cos(\omega_s - \omega_r)t + k - 120^\circ \\ \cos(\omega_s - \omega_r)t + k - 240^\circ \end{bmatrix} \quad \text{แทนค่าลงในสมการ}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 0.887 \cdot \begin{bmatrix} \cos(314.16 - \omega_r)t - 16.84 \\ \cos(314.16 - \omega_r)t - 16.84 - 120^\circ \\ \cos(314.16 - \omega_r)t - 16.84 - 240^\circ \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.6 โครงสร้างการควบคุมแอมพลิจูดของ DFIG



บทที่ 6

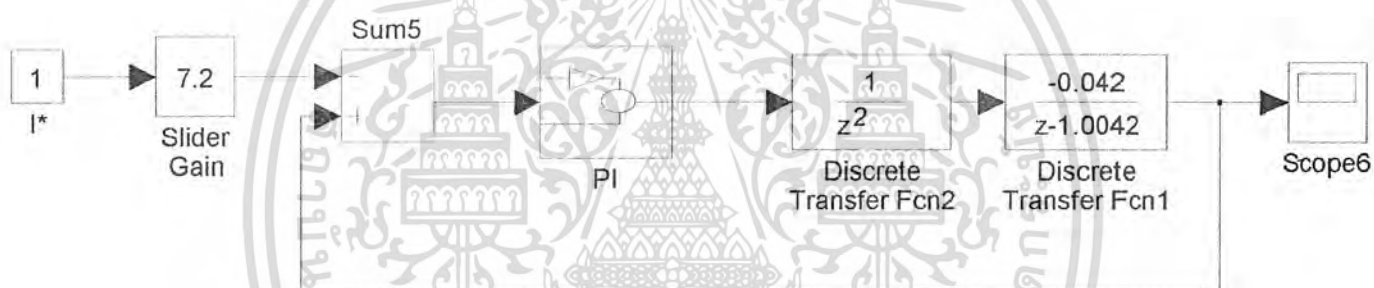
การทดลองและผลการทดลอง

6.1 การจำลองระบบควบคุม Front-end converter

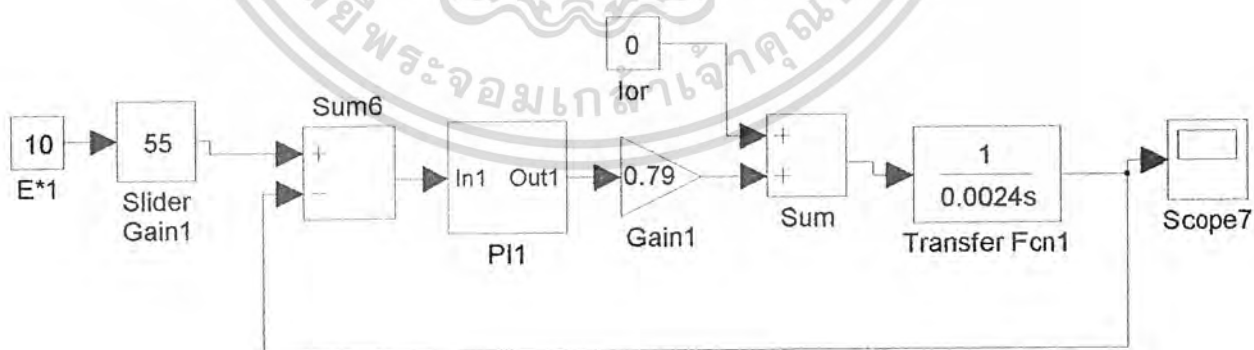
จากการศึกษาถึงการทำงานของ front-end converter ที่มีลักษณะการทำงานแบบ bidirectional power flow จึงได้จำลองระบบนี้ออกเป็น 2 ส่วนตามโหมดการทำงาน

6.1.1 Front-end converter เมื่อทำงานเป็น rectifier (rectifying mode) แสดงการจำลองระบบได้ดังรูปที่ 6.1

6.1.2 Front-end converter เมื่อทำงานเป็น inverter (inverting mode) ซึ่งแสดงการจำลองระบบนี้ในรูปที่ 6.2

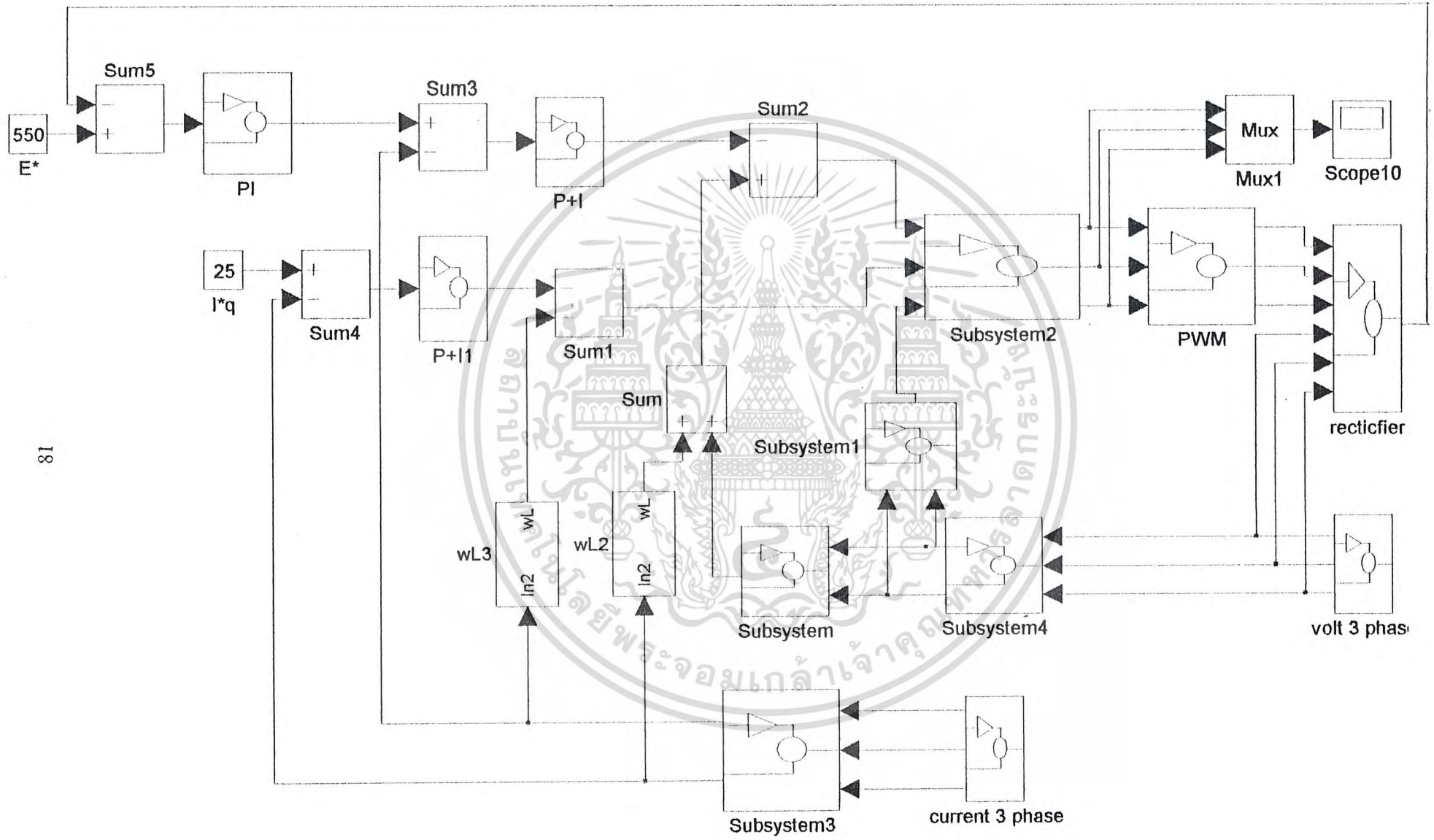


รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของรูปควบคุมกระแส



รูปที่ 6.2 บล็อกไดอะแกรมของรูปควบคุมแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

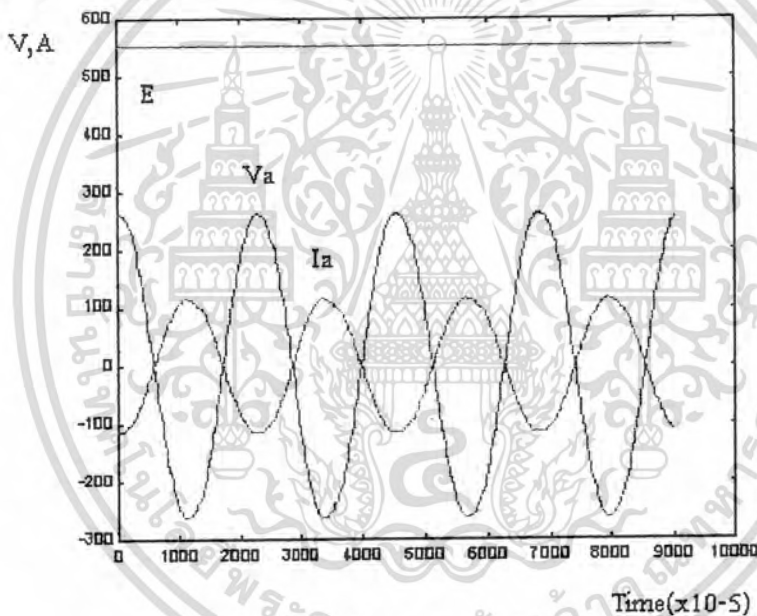


รูปที่ 6.3 บล็อก โปรแกรมของ front-end converter ในช่วง rectifying mode

6.2 ผลการทดลอง

6.2.1 เมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ bidirectional power flow

จากการทดลองการทำงานของ front-end converter ขณะ steady state ที่ displacement factor เป็นยูนิตี (กำหนดให้ กระแสของรีแอคทีฟเพาเวอร์ I_q^* เท่ากับ 0) ซึ่งจะได้แรงดัน DC-link ,แรงดันแหล่งจ่าย และ กระแส ซึ่ง ได้ขณะที่ คอนเวอร์เตอร์ทำตัวเป็นเรกติไฟเออร์ (rectifying mode) การทำงานลักษณะนี้แอคทีฟเพาเวอร์จะไหลเข้าสู่แรงดัน DC-link เป็นไปตามลักษณะการทำงานของเครื่องกำหนดไฟฟ้าขณะ subsynchronous ที่มี phase displacement ระหว่างแรงดันสเตเตอร์กับกระแสคอนเวอร์เตอร์เท่ากับศูนย์. และรูปที่ 6.5 แสดงถึงการทำงานของ front-end converter ในลักษณะที่เป็นอินเวอร์เตอร์ (inverting mode) แอคทีฟเพาเวอร์ไหลจากแรงดัน DC-link ออกสู่ระบบ ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานในช่วง supersynchronous. phase displacement ระหว่าง V_u กับ I_u เท่ากับ 180 องศา

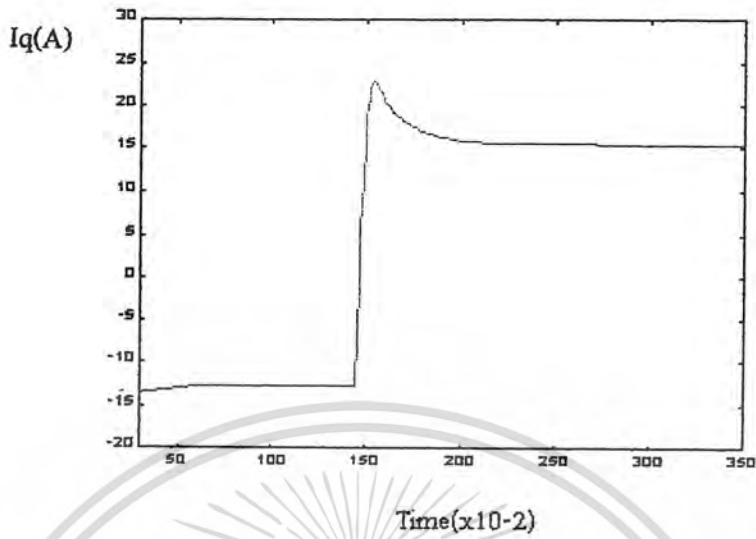


รูปที่ 6.5 Inverting Mode

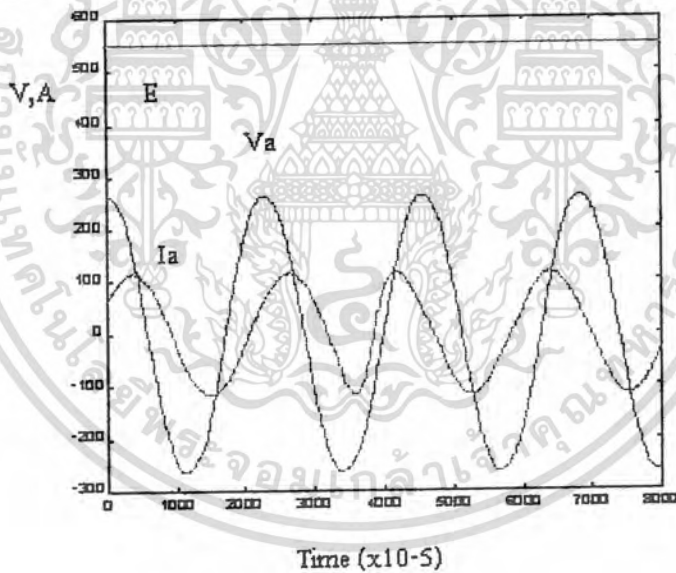
6.2.2 การทำงานที่มีมุมเพาเวอร์แฟคเตอร์ตาม (lagging) และ นำ (leading)

ความสามารถในการควบคุมการไหลของรีแอคทีฟเพาเวอร์ของ front-end converter โดยการควบคุม i_q ดังรูปที่ 6.6 ที่แสดงการตอบสนองของความถี่แอคทีฟที่เปลี่ยนไป ในขณะที่แอคทีฟเพาเวอร์ไหลจากแหล่งจ่ายเข้ามาที่แรงดัน DC-link (rectifying mode) i_q เปลี่ยนจาก $-14A$ ไปเป็น $14A$ รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อ i_q เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



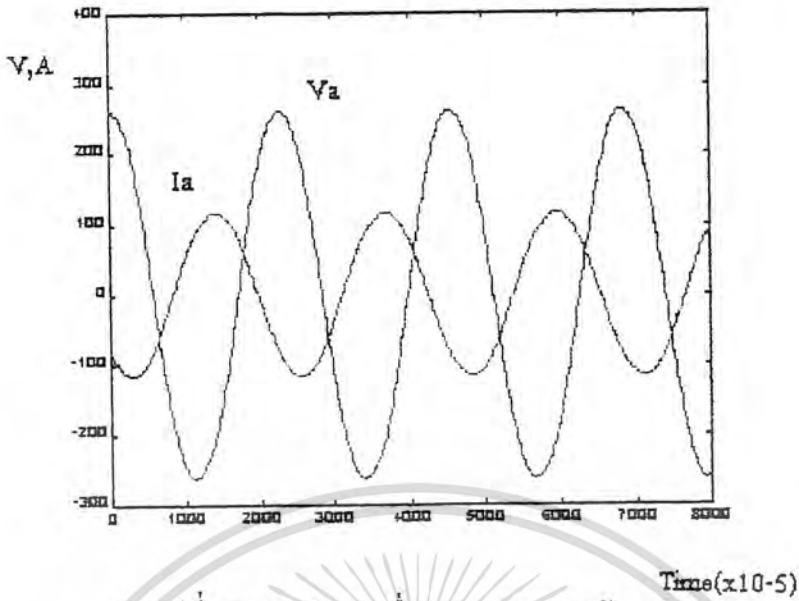
รูปที่ 6.6 (ก) การตอบสนองเมื่อกระแสในแกน q เปลี่ยนแปลง



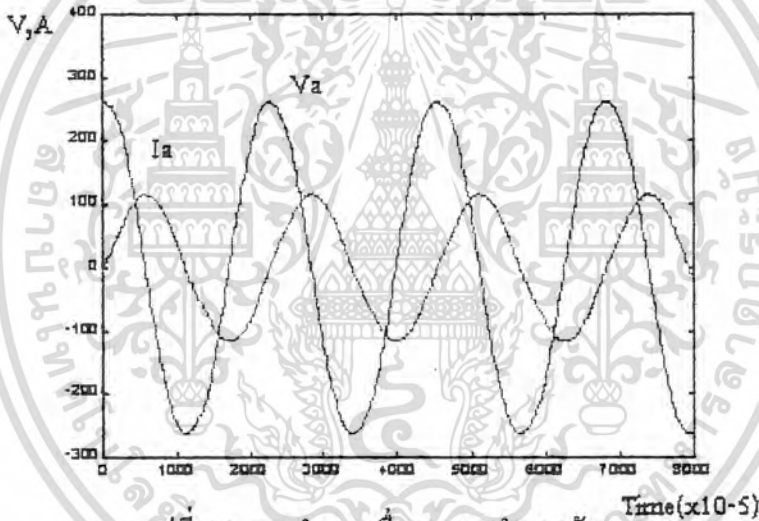
รูปที่ 6.6 (ข) แรงดันกับกระแส

รูปที่ 6.7 แสดงการทำงานขณะ steady state ของคอนเวอร์เตอร์ใน rectifying mode ที่มีมุมเฟสตาม (กระแสตามแรงดัน) ในขณะที่รูปที่ 6.8 เป็นการทำงานเมื่อกระแสนำแรงดัน ซึ่งเป็นผลที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของคอนเวอร์เตอร์ในการที่จะเป็นทั้งตัวรับและจ่ายรีแอกทีฟพาวเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 การทำงานเมื่อกระแสตามแรงดัน

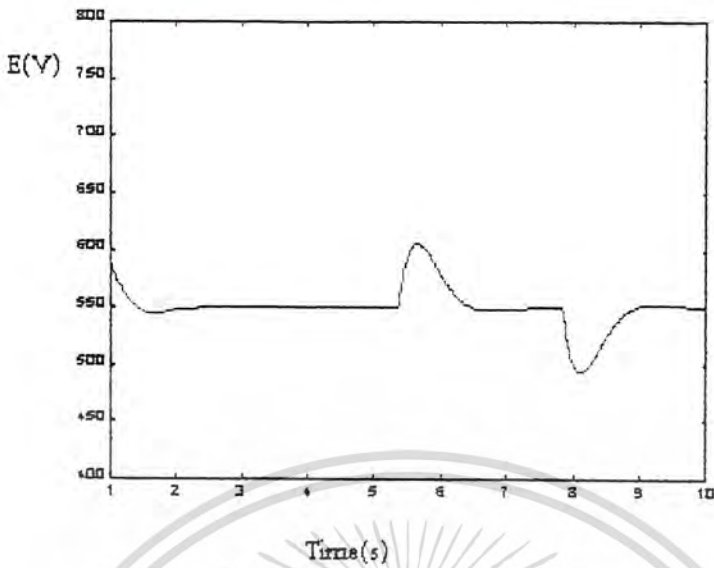


รูปที่ 6.8 การทำงานเมื่อกระแสไม่แรงดัน

6.2.3 การควบคุมแรงดัน DC-link

การทำงานของรูปควบคุมแรงดัน DC-link แสดงให้เห็น ได้จากการเปลี่ยนแปลงของเพาเวอร์ของคอนเวอร์เตอร์ที่ด้าน DC เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงผลการทำงานที่ทำได้ โดยการเปลี่ยนค่ากระแส โรเตอร์หรือสัญญาณรบกวน (i_{α}) โดยจะกำหนดค่าให้กระแสเปลี่ยนจากศูนย์ไปเป็น 12A และลดลงเป็นศูนย์อีกครั้ง ซึ่งจะ เป็นกรณีขั้นสุดท้ายที่สุดของรูปควบคุมแรงดันของ front-end converter ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 เมื่อเกิดข้อผิดพลาดระบบควบคุมก็จะปรับเข้าสู่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

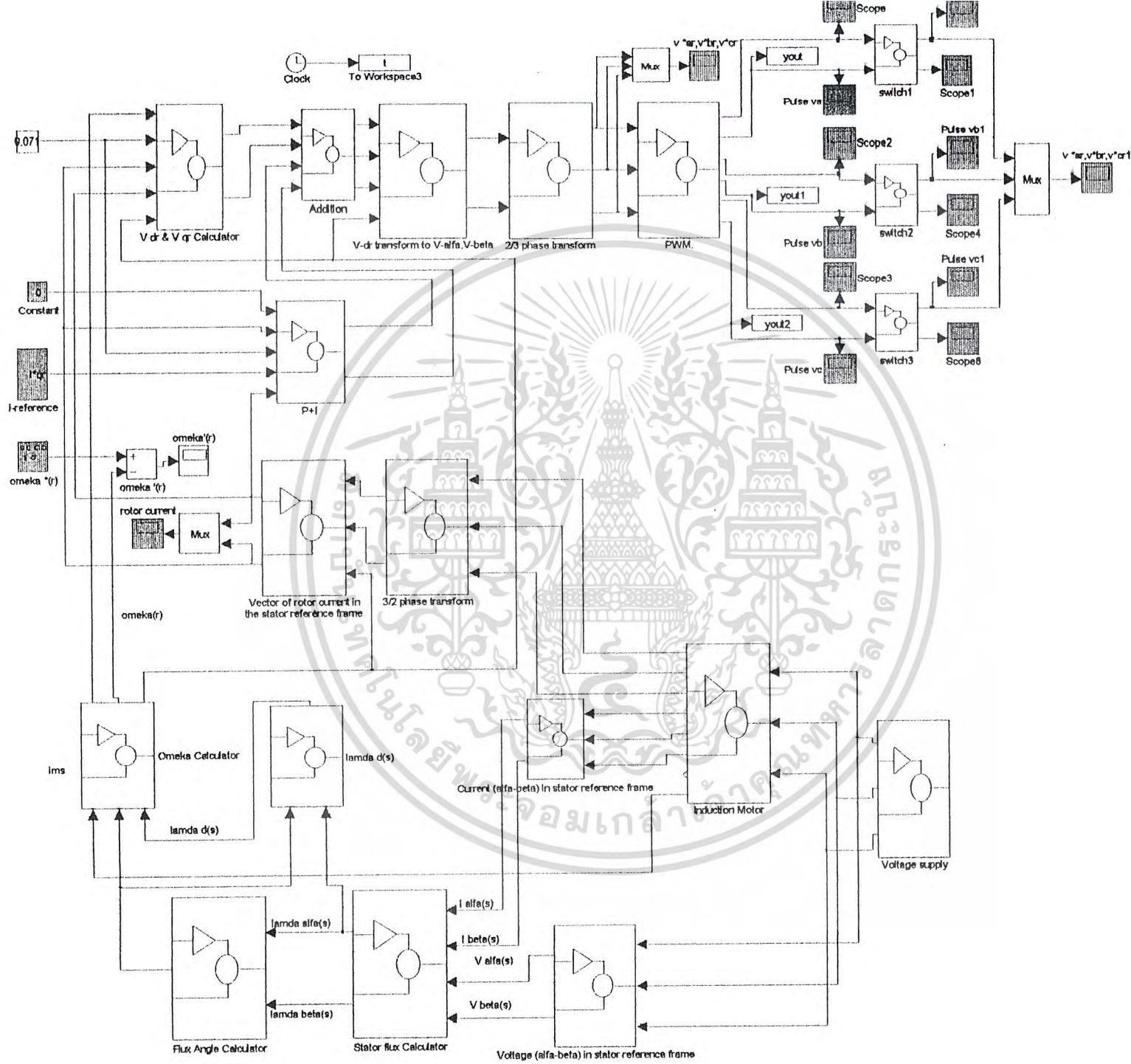


รูปที่ 6.9 การตอบสนองของกลุ่มควบคุมแรงดัน DC-link

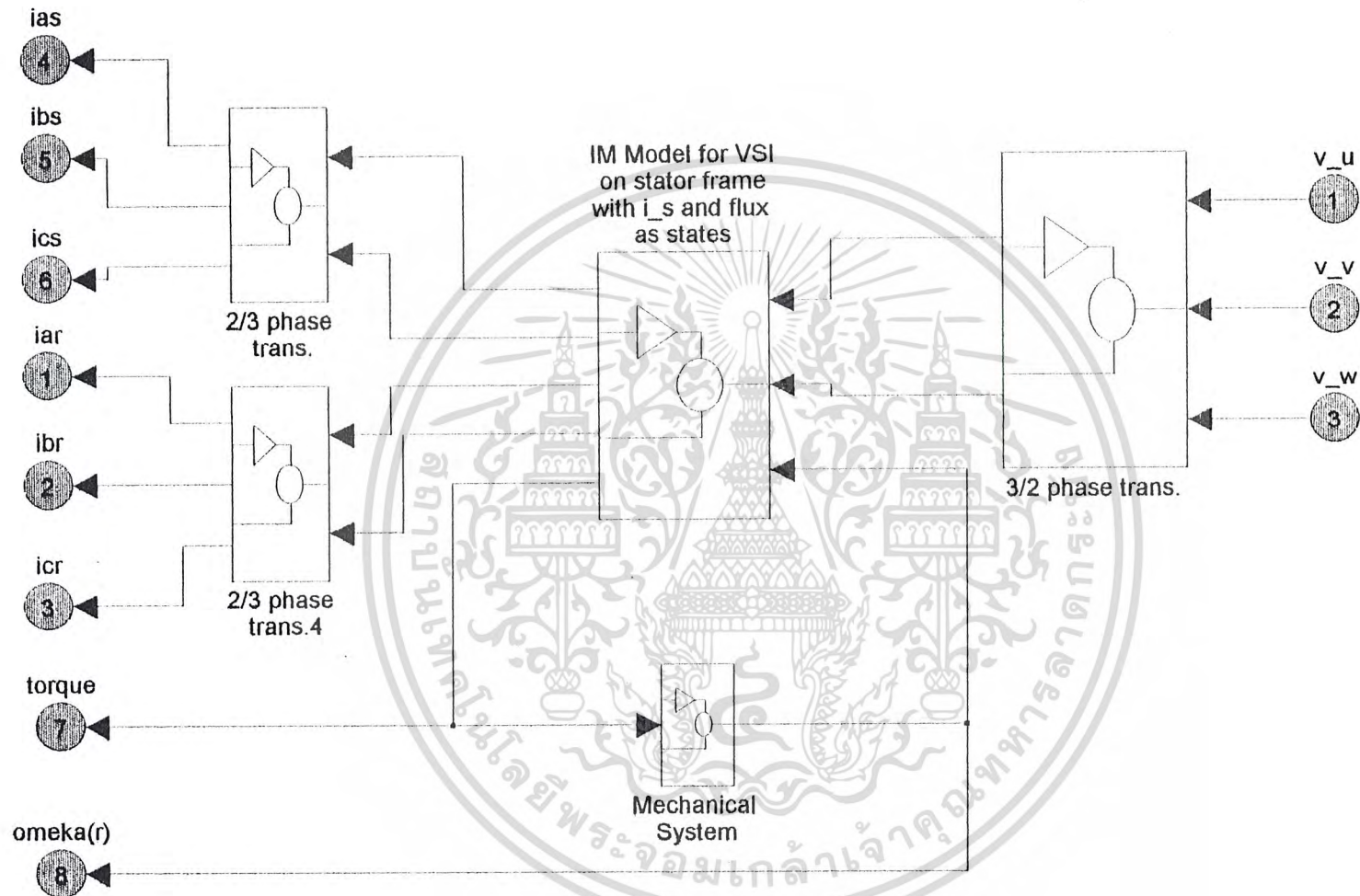
6.3 การจำลองระบบการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

จากการศึกษาการควบคุมเครื่องจักรเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ นั้นสามารถนำมาจำลองระบบ โดยรวมได้ ดังรูปโดยแบ่งเป็นส่วนของการควบคุมและส่วนของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

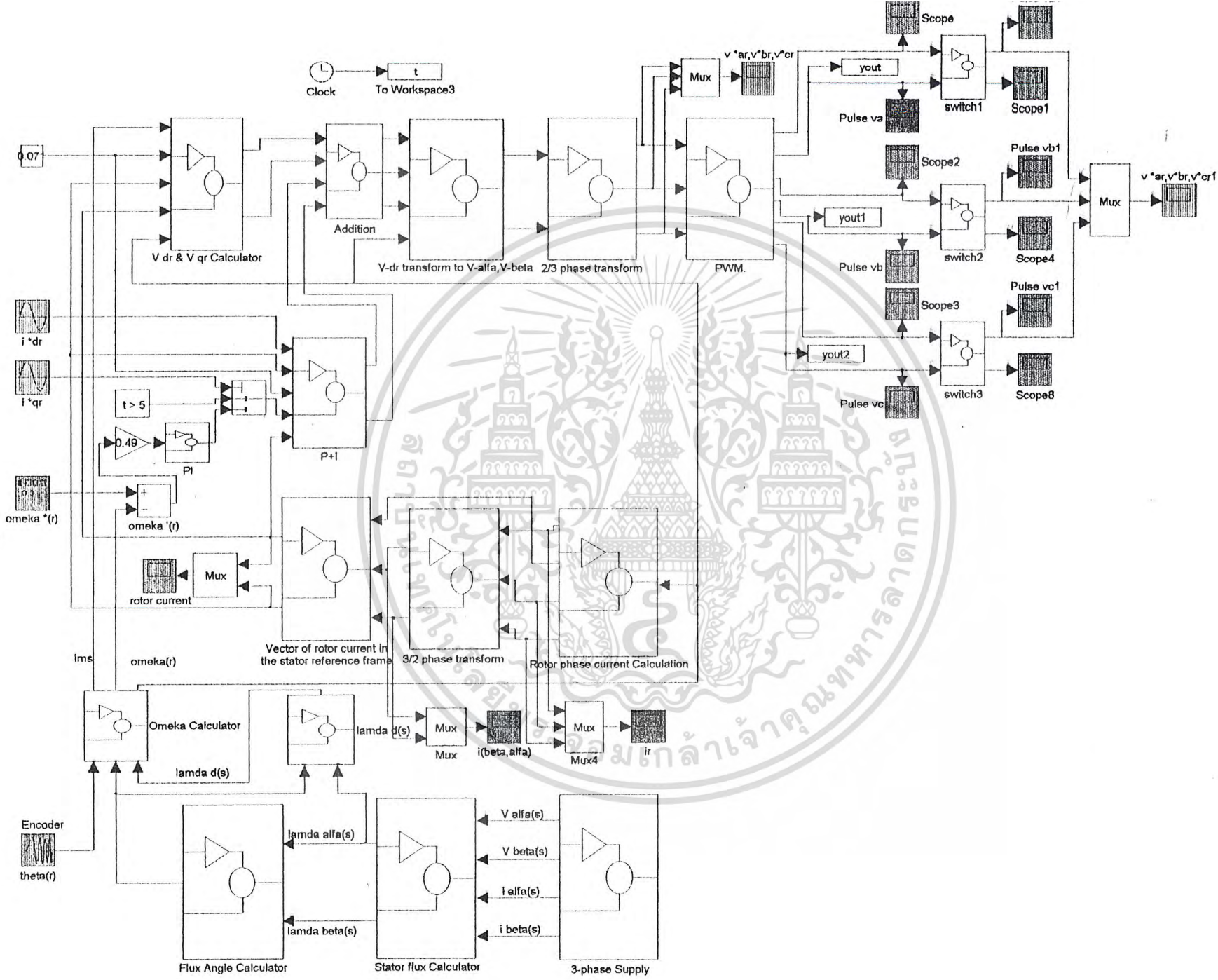


รูปที่ 6.10 ปกติ ได้ระบบการควบคุมเครื่องเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์โดยรวม



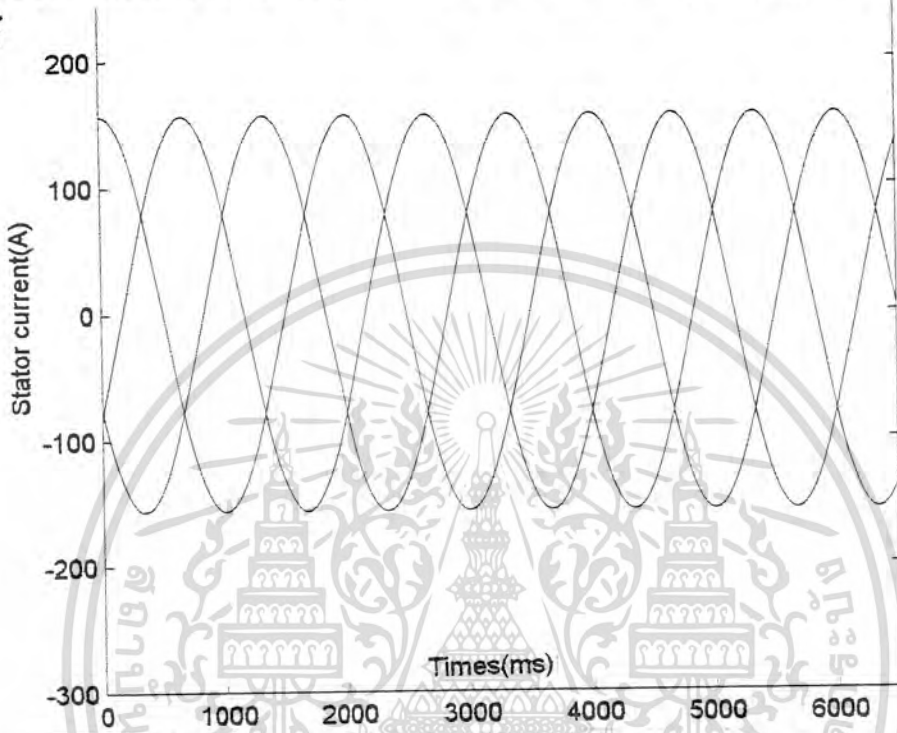
Induction machine

รูปที่ 6.11 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

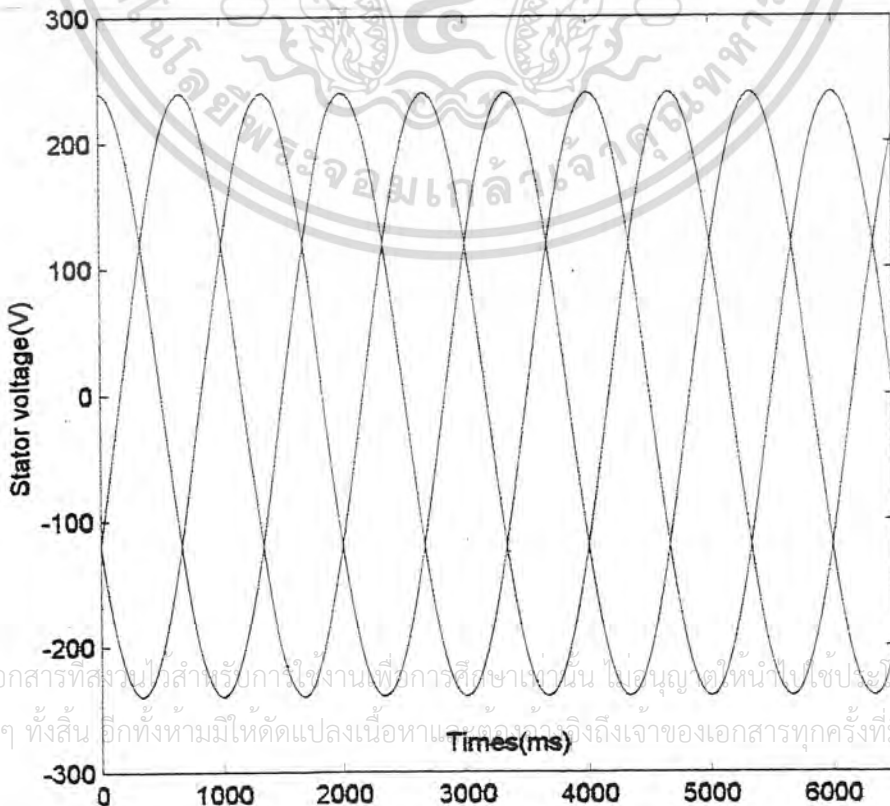


รูปที่ 6.12 บล็อกโคและแกรมของระบบการควบคุมเครื่องหมยวนแบบบวคเคอร์

จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง quadrature ว่ามีผลอย่างไรบ้างกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสสเตเตอร์ และแรงดันสเตเตอร์ ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสโรเตอร์ด้วย กระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง quadrature นี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ก็จะต้องมีการควบคุมกระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง quadrature ภายใต้การควบคุมแบบเวกเตอร์

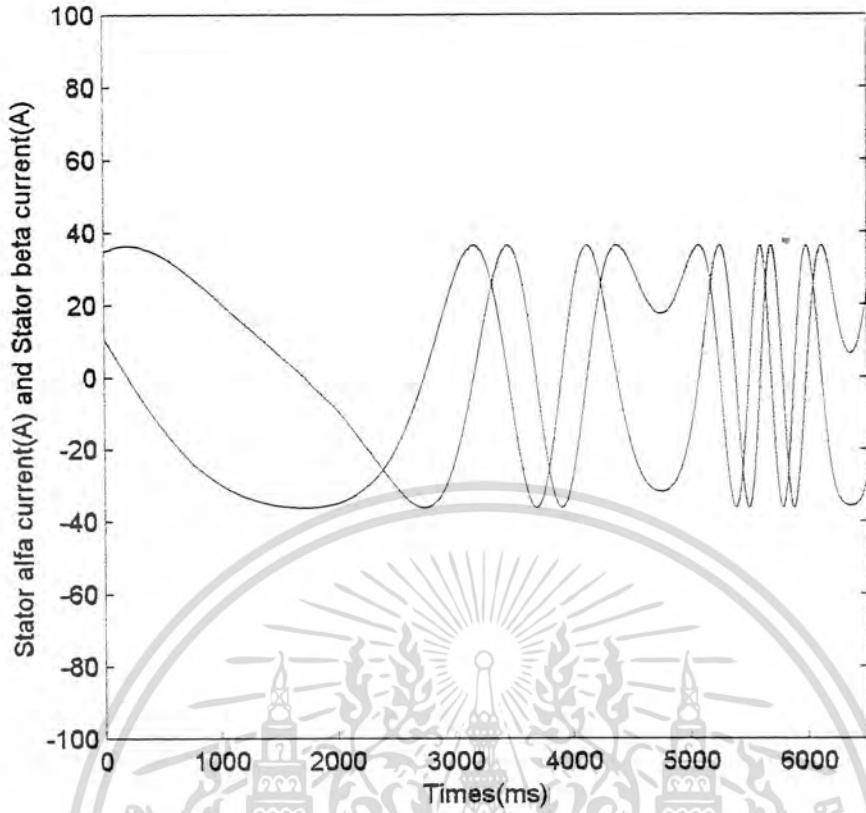


รูปที่ 6.13 แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

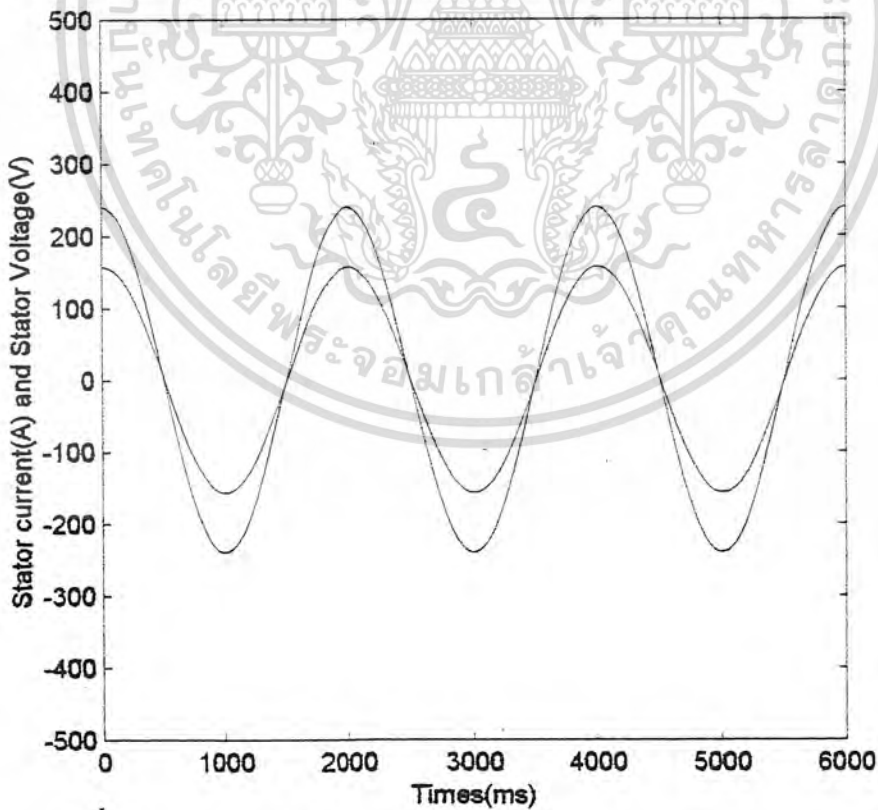


รูปที่ 6.14 กระแสสเตเตอร์ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

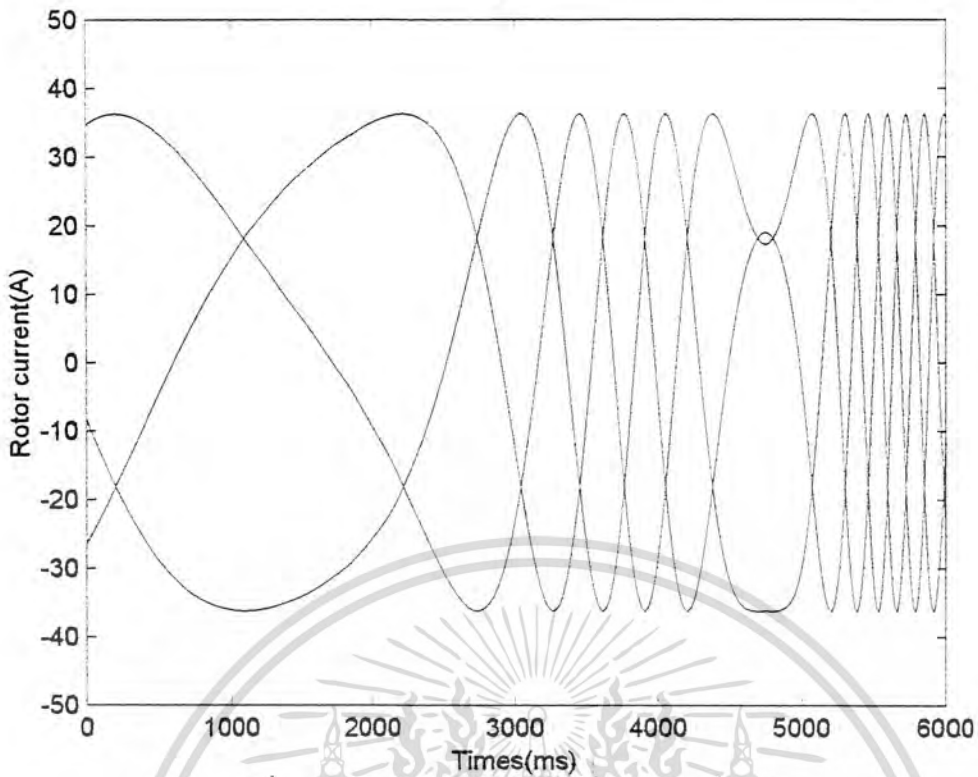


รูปที่ 6.15 กระแสสเตเตอร์ในแกนอ้างอิงชุดหนึ่งแบบ alpha-beta

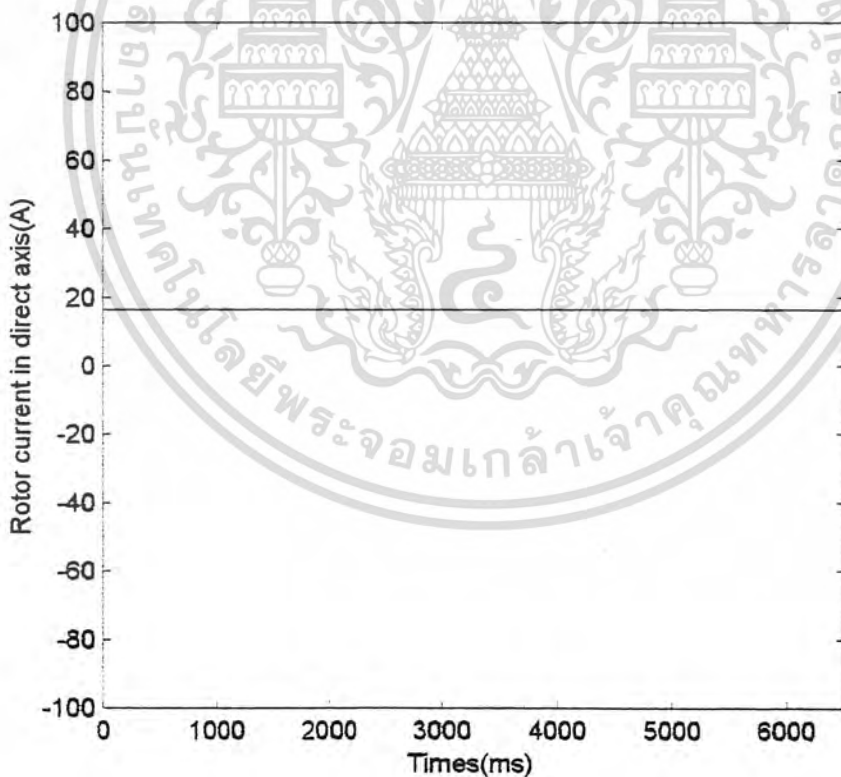


รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบลักษณะของกระแสสเตเตอร์ และแรงดันสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

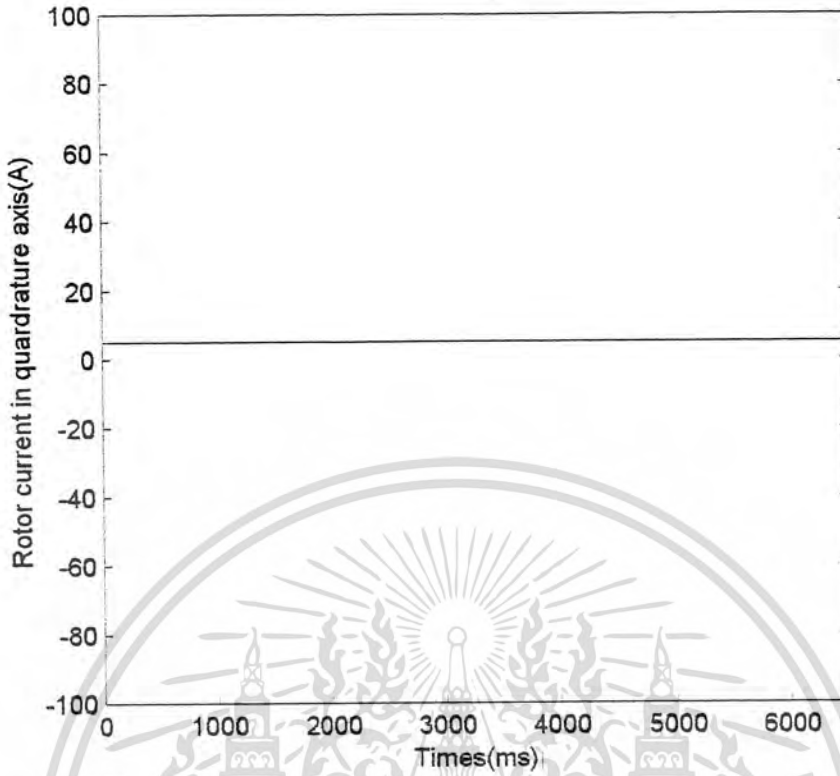


รูปที่ 6.17 กระแสโรเตอร์ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

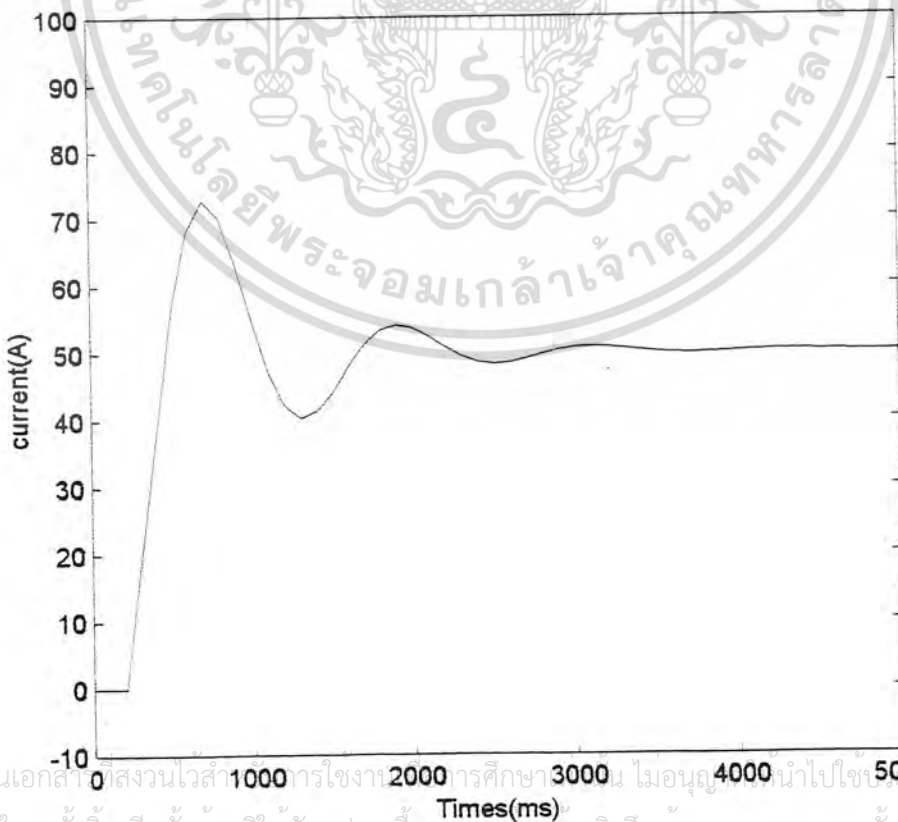


รูปที่ 6.18 กระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง direct ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.19 กระแสโรเตอร์ในแกนอ้างอิง quadrature ของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
0-1000ms 1000-2000ms 2000-3000ms 3000-4000ms 4000-5000ms
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.20 การควบคุมค่ากระแสในวงจรควบคุมแบบ Close Loop

บทที่ 7

บทวิจารณ์ และสรุป

7.1 บทวิจารณ์

การศึกษาการจำลองระบบของ Wind Turbine Generator เพื่อวิเคราะห์การทำงานโดยรวมของระบบ เหตุที่เลือกทำโครงการแบบจำลองนี้ เพราะต้องการรู้ว่าประเทศไทยสามารถใช้ Wind Turbine Generator ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้หรือไม่ โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงของกระแสลมจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเป็นข้อมูลป้อนเข้าโปรแกรมเพื่อศึกษา โดยเลือกใช้โปรแกรม Matlab และ Simulink ในการจำลองระบบ

ระบบที่จำลองเป็นการต่อระบบ Scherbius เข้ากับ Induction Generator เพื่อการควบคุม Gen และคืนพลังงานเพื่อลดการสูญเสียของระบบ จากการศึกษาและการดำเนินการทดลอง พบว่าระบบ Scherbius ที่ใช้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียพลังงาน

จากผลที่ได้มา พบว่ากระแสในแกน i_d และ i_q เป็นอิสระต่อกัน ซึ่ง i_d มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดในลักษณะแปรผันตรงกัน เมื่อเปรียบได้กับกระแสอาร์เมเจอร์ในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกขดลวดกระตุ้น และ i_q มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก และ ในส่วนของ Front-End Converter พบว่ารีแอคทีฟพาวเวอร์สามารถควบคุมได้โดยการปรับ i_d และใช้ PWM ในการควบคุม DC Link ให้คงที่

ความผิดพลาดของผลการทดลองในบางส่วน เกิดจากข้อมูลที่ใช้อย่างยังไม่ครอบคลุม และความผิดพลาดในบางส่วนของวงจรควบคุม ทำให้ไม่สามารถควบคุม i_d, i_q ให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ โดยคาดว่าควรแก้ไขในส่วน Motor Module และน่าจะแก้ไขได้ในที่สุด

7.2 บทสรุป

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานโดยลำพังหรือต่อกับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ถูกควบคุมความเร็วรอบโดยกังหันลม และมีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบเซอร์เบียด ระบบนี้จะเป็นระบบคืนพลังงาน (Power Recovery) และมีการปรับปรุงคุณภาพของแรงดันและความถี่ โดยระบบนี้ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็นเรกติฟายเออร์ และอินเวอร์เตอร์ เชื่อมต่อกันด้วย DC Link (ทำหน้าที่ปรับปรุกระแสไฟตรง และดูแลจัดการกระแสของแรงดันจากคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ด้าน การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ตัว จะควบคุมโดยใช้ Vector Control

การควบคุมแบบ Vector Control ของ Front-End คอนเวอร์เตอร์ ด้วยแกนอ้างอิงในแนวเดียวกับแฉกเครื่องแรงดันทางด้านสเตเตอร์ นำไปสู่การควบคุมการส่งผ่านแอคทีฟ และรีแอคทีฟพาวเวอร์ ระหว่างแหล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลระบบจะเขียนหน้ากระดาษไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายกับคอนเวอร์เตอร์ ส่วน DC Link Voltage จะถูกควบคุมด้วยค่าสลิปและรีแอกทีฟพาวเวอร์ ความสามารถของคอนเวอร์เตอร์ที่จะบังคับ Displacement Angle (ระหว่างแหล่งจ่ายกับกระแส AC) ขึ้นกับผลการทดลองว่าจะมี Displacement Power Factor เป็น Unity, Lead หรือ Lag

Stator Flux Oriented Control สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า จะมีการควบคุมที่เป็นอิสระต่อกันระหว่างแรงบิดกับกระแสกระตุ้นที่โรเตอร์ในเครื่องจักรเหนี่ยวนำ ซึ่งการควบคุมใน Front-End คอนเวอร์เตอร์ แบบนี้จะคล้ายกับการควบคุมที่เป็นอิสระต่อกันระหว่างกระแสในแกน Direct และแกน Quadrature ในส่วนของการปรับปรุงความเร็วลม Vector Control กับระบบเซอร์เบียงถูกนำมาใช้ในการหา Tracking ที่เหมาะสม มีด้วยกัน 2 วิธี คือ DSC (Direct Speed Control) และ ISC (Indirect Speed Control)

DSC จะให้ความเร็วรอบที่สูงกว่า ISC เพราะเป็นการใช้แรงบิดเต็มพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ถ้ามองอีกด้านหนึ่ง ISC จะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่เร็วกว่า ที่สุดแล้วก็จะเป็นแบบเดียวกันกับที่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ DSC ยังช่วยในการประมาณค่าแรงบิดทางกลเพื่อตั้งค่านีกรกฎชั้นสำหรับป้องกันโหลดเกิน

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดตามต่ำทั้ง จะใช้วิธี Stator Field Orientation โดยทางอ้อมในการควบคุมการจ่ายโหลด กระแสด้านโรเตอร์ในแกน Direct จะถูกใช้ในการควบคุม สเตเตอร์ฟลักซ์ และเป็นการควบคุมแรงดันด้านสเตเตอร์โดยทางอ้อมด้วย ขณะที่กระแสด้าน โรเตอร์ในแกน Quadrature ถูกนำไปใช้ในการควบคุม Orientation แทนที่จะควบคุมแรงดันด้าน สเตเตอร์ การควบคุมสเตเตอร์ฟลักซ์สามารถช่วยในการแก้ปัญหาที่เป็นผลมาจากโหลดทั้งฝั่งแหล่งจ่าย ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งของการควบคุมสเตเตอร์ฟลักซ์คือ Orientation ทั้งใน Rotor คอนเวอร์เตอร์ และใน Front-End คอนเวอร์เตอร์ ไม่ได้รับผลกระทบจากการเกิดฮาร์โมนิกที่แรงดันขาออก

การใช้ Vector Control ที่ถูกต้องจะแสดงผลผ่านการจ่ายแอกทีฟและรีแอกทีฟพาวเวอร์จากเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ เพื่อป้องกันเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความสามารถของ Front-End คอนเวอร์เตอร์ ที่จะดูดซับหรือจ่ายรีแอกทีฟพาวเวอร์ถูกใช้เลียนแบบโหลดเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ ให้ค่า Voltage Regulation ที่สภาวะคงตัวประมาณ 3% (และเพิ่มเป็น 5% ถ้าคิดทราวมเชียนส์จากกำลังลม)

สำหรับการควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านโหลดช่วยเพื่อที่จะปรับค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมเพื่อเกิดพลังงานสูงสุด โดยมีการควบคุมความถี่และแรงดันขาออก จะต้องมีการทดสอบทั้งแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้น ๆ ของความเร็วลม และใช้ลมจริง ๆ

ประโยชน์ของระบบเซอร์เบียงต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า หรือ ทำงานเดี่ยวๆ ที่ใช้งานกำลังลม คือ กำลังทางไฟฟ้าสามารถกำเนิดขึ้นทั้งในสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ Supersynchronous Speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก (ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

JANUARY 1996
 STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

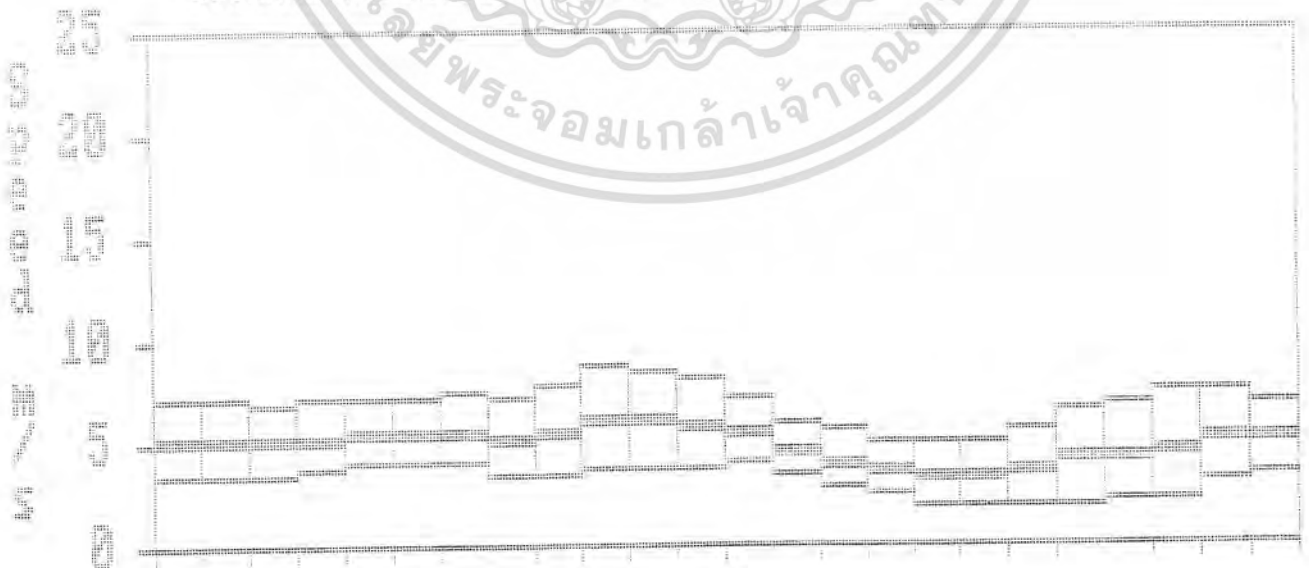
```
#####
```

##	Mean Wind Speed	5.0	m/s	##	
##	Standard Deviation of Wind Speeds	2.0	m/s	##	
##	Mean Turbulence Intensity	0.163		##	
##	Mean Energy Speed	6.9	m/s	##	
##	Std. Deviation of Energy Distribution	1.5	m/s	##	
##	Mean Power Density	114	Watts/m2	##	
##	Max. 1-hour Wind Speed on Day 7, 11:00	9.5	m/s	ENE	##
##	Max. 1-sec. Wind Speed	N/A		N/A	##
##	Dominant Wind Energy Direction			ENE	##
##	Dominant Wind Speed Direction			ENE	##
##	Max. Daily Mean Speed on Day 1	7.3	m/s	##	
##	Min. Daily Mean Speed on Day 26	3.0	m/s	##	
##	Assumed Average Air Density	1.209	kg/m3	##	
##	Energy Pattern Factor	1.50		##	
##	Weibull Shape Factor, k	2.69		##	
##	Weibull Scale Factor, c	5.6	m/s	##	
##	Speed Data Recovery	100.0	%	##	
##	Turbulence Intensity Data Recovery	100.0	%	##	
##	Direction Data Recovery	98.3	%	##	
##				##	

```
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



HOUR: 0 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOURLY WIND SPEED GRAPH

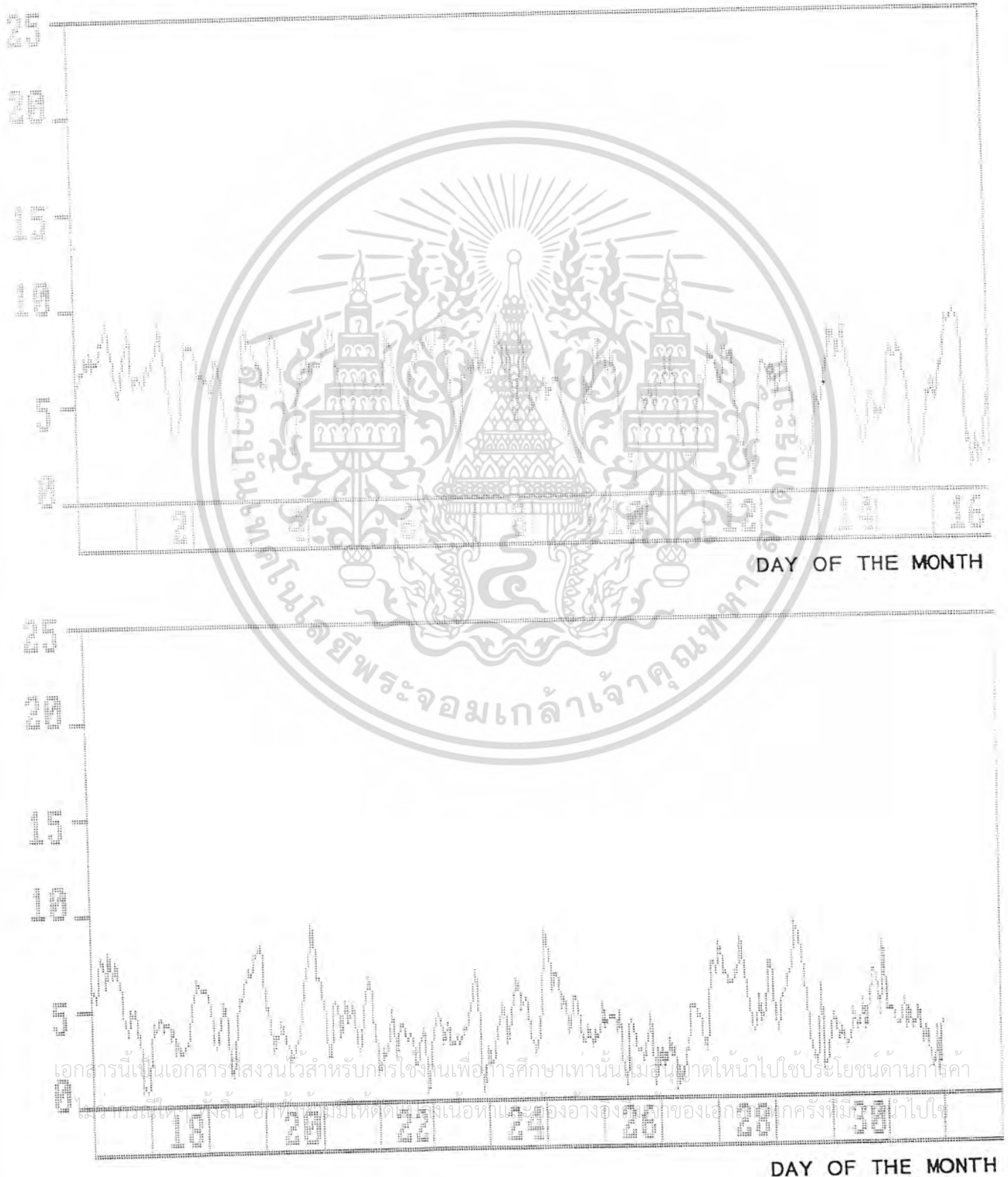
DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

JANUARY 1996
 STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 โปรดติดต่อ สำนัก อากาศ มีมติเห็นด้วยกับเงื่อนไขของเอกสารนี้ของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีนำไปใช้

DAY OF THE MONTH

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

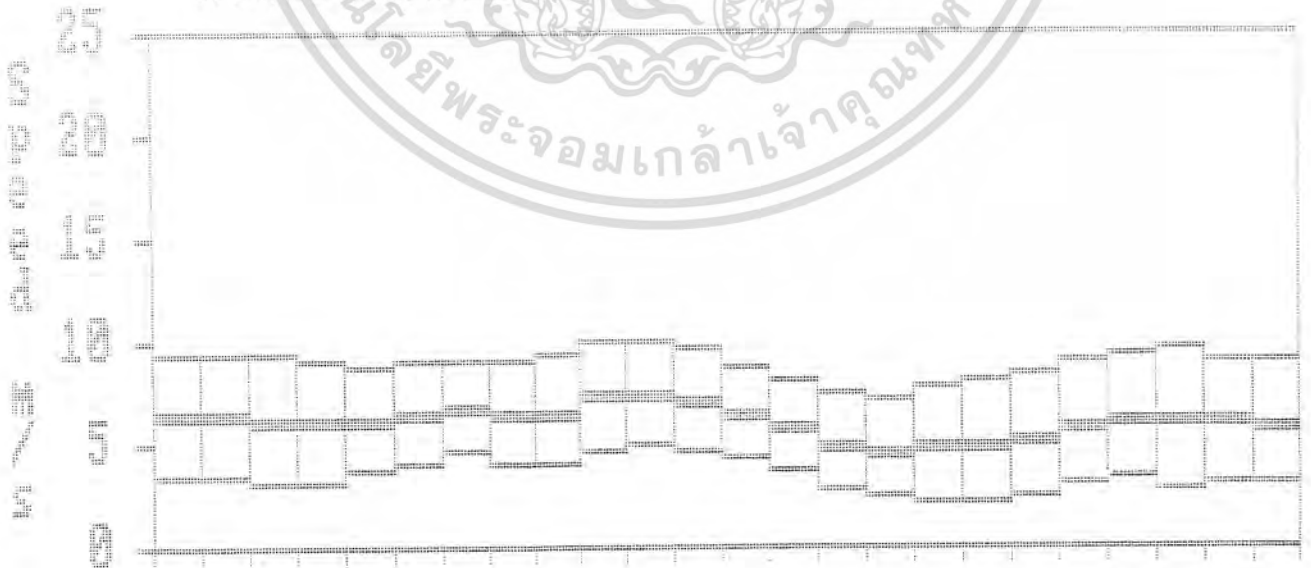
FEBRUARY 1996
 STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
##
## Mean Wind Speed                6.2    m/s    ##
## Standard Deviation of Wind Speeds  2.8    m/s    ##
## Mean Turbulence Intensity        0.176          ##
## Mean Energy Speed                8.8    m/s    ##
## Std. Deviation of Energy Distribution  1.8    m/s    ##
## Mean Power Density              228    Watts/m2 ##
## Max. 1-hour Wind Speed on Day 20, 01:00 12.6   m/s    ENE  ##
## Max. 1-sec. Wind Speed          N/A          N/A  ##
## Dominant Wind Energy Direction          ENE  ##
## Dominant Wind Speed Direction          ENE  ##
## Max. Daily Mean Speed on Day 21      10.3   m/s    ##
## Min. Daily Mean Speed on Day 17       2.9   m/s    ##
## Assumed Average Air Density          1.209  kg/m3  ##
## Energy Pattern Factor                1.60          ##
## Weibull Shape Factor, k              2.45          ##
## Weibull Scale Factor, c              7.0    m/s    ##
## Speed Data Recovery                 100.0   %    ##
## Turbulence Intensity Data Recovery    100.0   %    ##
## Direction Data Recovery              98.7   %    ##
##
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



HOUR: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program WD-SMRY v3.30 Latest Revision 10 APR 92

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

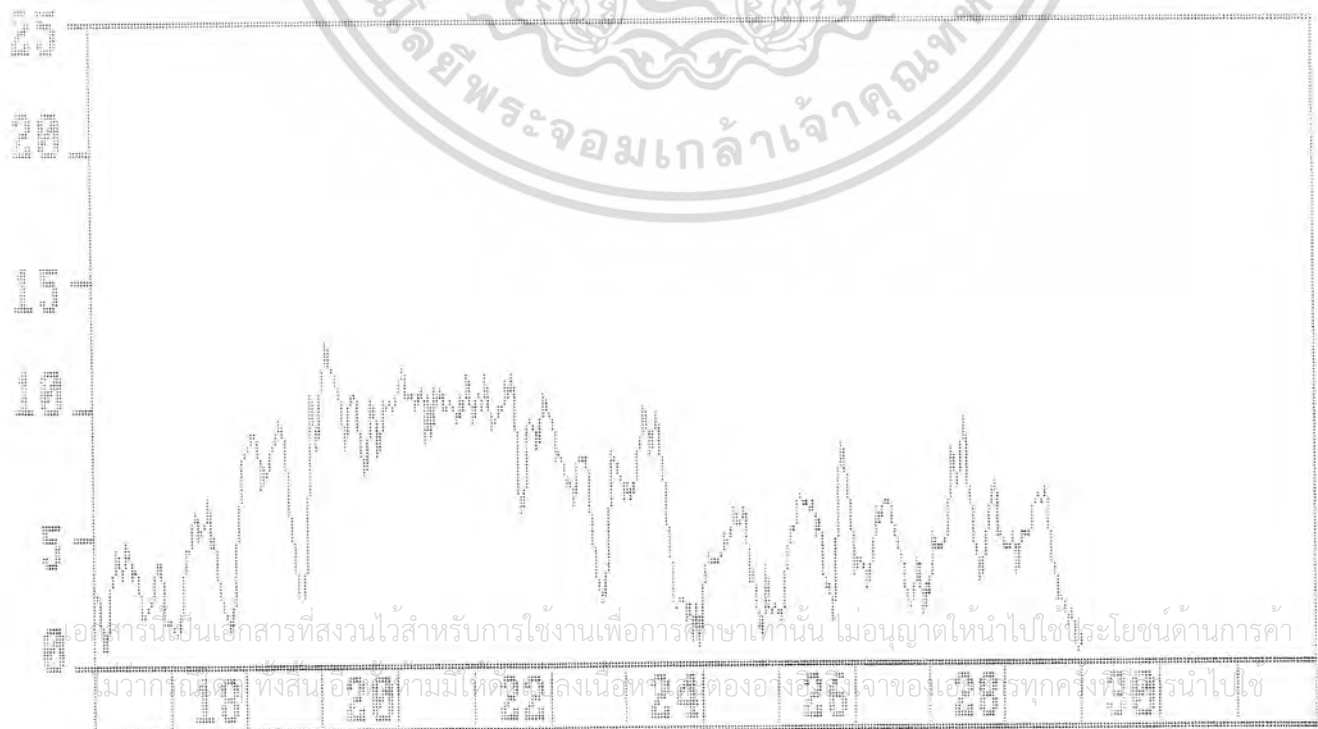
FEBRUARY 1996
 STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH



DAY OF THE MONTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 มวารณสุด ทงสน อุตหามมิให้ตูลงเนือหาตององฮิงจางของเฮีรทุกครั้งที่รนำไปไซ

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHER ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHER PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

MARCH 1996
 STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
```

##				##
##	Mean Wind Speed	4.5	m/s	##
##	Standard Deviation of Wind Speeds	2.3	m/s	##
##	Mean Turbulence Intensity	0.172		##
##	Mean Energy Speed	7.2	m/s	##
##	Std. Deviation of Energy Distribution	2.0	m/s	##
##	Mean Power Density	103	Watts/m2	##
##	Max. 1-hour Wind Speed on Day 31, 17:00	11.7	m/s WNW	##
##	Max. 1-sec. Wind Speed	N/A	N/A	##
##	Dominant Wind Energy Direction		ENE	##
##	Dominant Wind Speed Direction		ENE	##
##	Max. Daily Mean Speed on Day 13	6.7	m/s	##
##	Min. Daily Mean Speed on Day 23	2.1	m/s	##
##	Assumed Average Air Density	1.209	kg/m3	##
##	Energy Pattern Factor	1.83		##
##	Weibull Shape Factor, k	2.09		##
##	Weibull Scale Factor, c	5.1	m/s	##
##	Speed Data Recovery	100.0	%	##
##	Turbulence Intensity Data Recovery	99.3	%	##
##	Direction Data Recovery	97.6	%	##
##				##

```
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



Hour: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22
 ไม่มีการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
Location.....PROMTHERP PHUKET
Station Elevation.....80 M ASL
Station Height.....36 M AGL
Averaging Time.....1-HOUR

MARCH 1996
STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH

DAY OF THE MONTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ผู้มีความกรุณาใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร/องค์กรดังกล่าว

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
Location.....PROMTHERP PHUKET
Station Elevation.....80 M ASL
Station Height.....36 M AGL
Averaging Time.....1-HOUR

APRIL 1996
STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อมีวัตถุประสงค์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
และการบริการใด ๆ ก็ตาม กรุณาขอขออนุญาตก่อนนำเอกสารนี้ไปใช้

DAY OF THE MONTH

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

MAY 1996
 STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
```

##										##
##	Mean Wind Speed	4.2	m/s							##
##	Standard Deviation of Wind Speeds	2.8	m/s							##
##	Mean Turbulence Intensity	0.098								##
##	Mean Energy Speed	9.5	m/s							##
##	Std. Deviation of Energy Distribution	3.7	m/s							##
##	Mean Power Density	121	Watts/m2							##
##	Max. 1-hour Wind Speed on Day 1, 01:00	16.4	m/s	W						##
##	Max. 1-sec. Wind Speed	N/A		N/A						##
##	Dominant Wind Energy Direction			W						##
##	Dominant Wind Speed Direction			WSW						##
##	Max. Daily Mean Speed on Day 1	13.4	m/s							##
##	Min. Daily Mean Speed on Day 30	1.5	m/s							##
##	Assumed Average Air Density	1.209	kg/m3							##
##	Energy Pattern Factor	2.71								##
##	Weibull Shape Factor, k	1.51								##
##	Weibull Scale Factor, c	4.7	m/s							##
##	Speed Data Recovery	38.6	%							##
##	Turbulence Intensity Data Recovery	38.4	%							##
##	Direction Data Recovery	38.6	%							##
##										##
##										##

```
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN

เอกสารที่ 2 รับการ 6 งาน 8 การ 10 12 14 16 18 20 22

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program WD-SMRY

v3.30

Latest Revision 10 APR 92

NRG SYSTEMS INC. USA

DATALOG2

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHEP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
Location.....PROMTHEP PHUKET
Station Elevation.....80 M ASL
Station Height.....36 M AGL
Averaging Time.....1-HOUR

MAY 1996
STATION 02

Date Printed.....13 MAR 98
Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หรือการอื่นใด ทั้งสิ้น. กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้าหากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาแจ้ง
ชื่อและตำแหน่งของท่านมาที่ ฝ่ายข้อมูลสารสนเทศ โทร. 0-2327-5000 หรือ อีเมล: info@pet.go.th

DAY OF THE MONTH

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

JUNE 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
##
## Mean Wind Speed                3.5    m/s    ##
## Standard Deviation of Wind Speeds  1.8    m/s    ##
## Mean Turbulence Intensity        0.165          ##
## Mean Energy Speed                6.7    m/s    ##
## Std. Deviation of Energy Distribution  3.0    m/s    ##
## Mean Power Density               51      Watts/m2 ##
## Max. 1-hour Wind Speed on Day 25, 03:00 13.1   m/s    WNW  ##
## Max. 1-sec. Wind Speed           N/A      N/A      ##
## Dominant Wind Energy Direction                    WNW  ##
## Dominant Wind Speed Direction                    WNW  ##
## Max. Daily Mean Speed on Day 25                6.6    m/s    ##
## Min. Daily Mean Speed on Day 7                  1.8    m/s    ##
## Assumed Average Air Density            1.209   kg/m3 ##
## Energy Pattern Factor                 2.03          ##
## Weibull Shape Factor, k                1.89          ##
## Weibull Scale Factor, c                3.9    m/s    ##
## Speed Data Recovery                   100.0   %      ##
## Turbulence Intensity Data Recovery       99.7   %      ##
## Direction Data Recovery                98.5   %      ##
##
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 HOUR: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOURLY WIND SPEED GRAPH

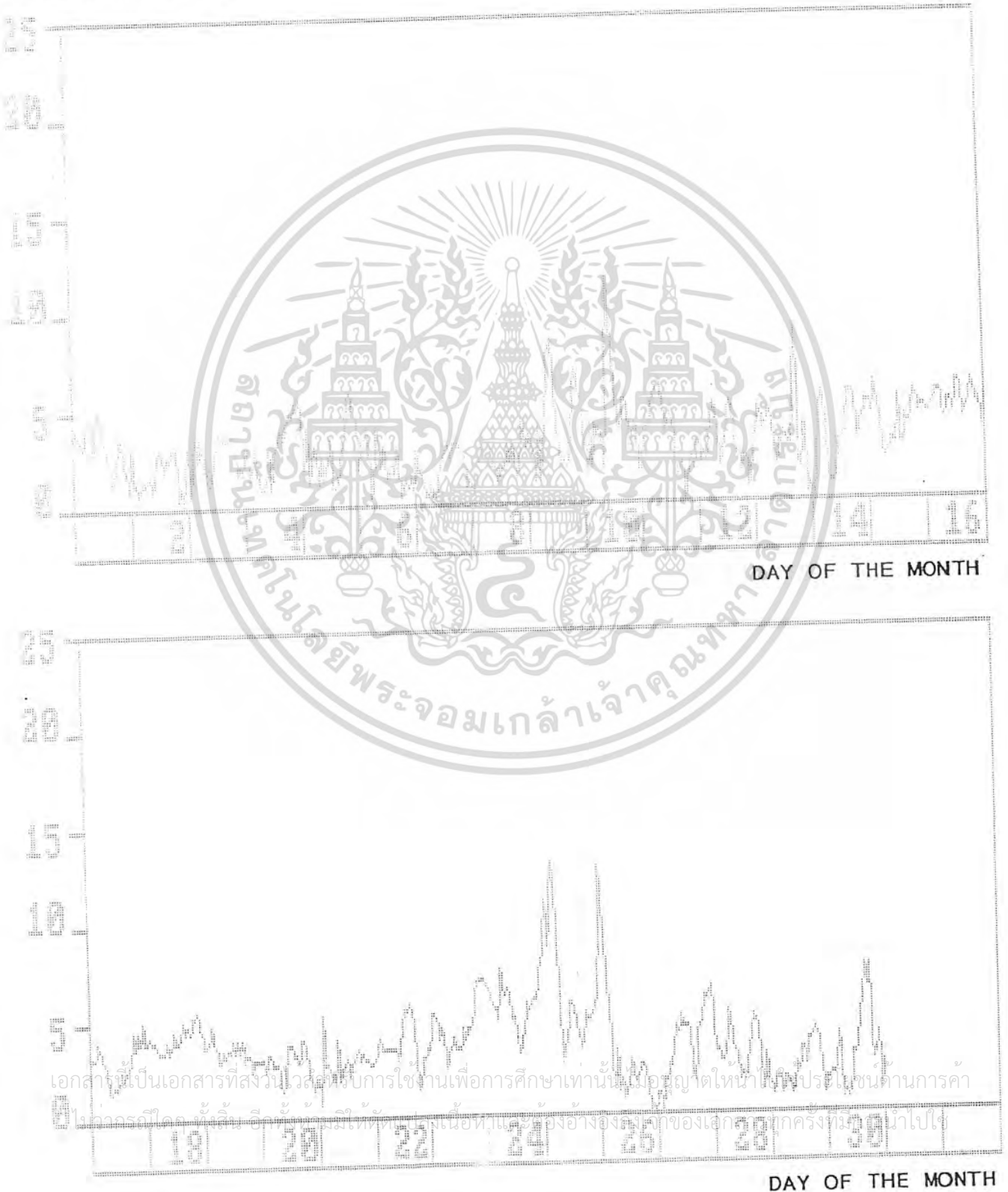
DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

JUNE 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์
 ในการตีพิมพ์นี้ ได้มีการแก้ไขข้อผิดพลาดที่พบในต้นฉบับ และยังคงสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารนี้ไว้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DAY OF THE MONTH

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHER ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHER PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

JULY 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
```

##				##
##	Mean Wind Speed	5.8	m/s	##
##	Standard Deviation of Wind Speeds	3.7	m/s	##
##	Mean Turbulence Intensity	0.127		##
##	Mean Energy Speed	10.5	m/s	##
##	Std. Deviation of Energy Distribution	2.4	m/s	##
##	Mean Power Density	275	Watts/m2	##
##	Max. 1-hour Wind Speed on Day 29, 05:00	15.3	m/s WSW	##
##	Max. 1-sec. Wind Speed	N/A	N/A	##
##	Dominant Wind Energy Direction		WSW	##
##	Dominant Wind Speed Direction		WSW	##
##	Max. Daily Mean Speed on Day 29	12.2	m/s	##
##	Min. Daily Mean Speed on Day 19	1.6	m/s	##
##	Assumed Average Air Density	1.209	kg/m3	##
##	Energy Pattern Factor	2.38		##
##	Weibull Shape Factor, k	1.65		##
##	Weibull Scale Factor, c	6.4	m/s	##
##	Speed Data Recovery	100.0	%	##
##	Turbulence Intensity Data Recovery	99.6	%	##
##	Direction Data Recovery	99.1	%	##
##				##

```
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ร่วมกันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
 ไรวาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOURLY WIND SPEED GRAPH

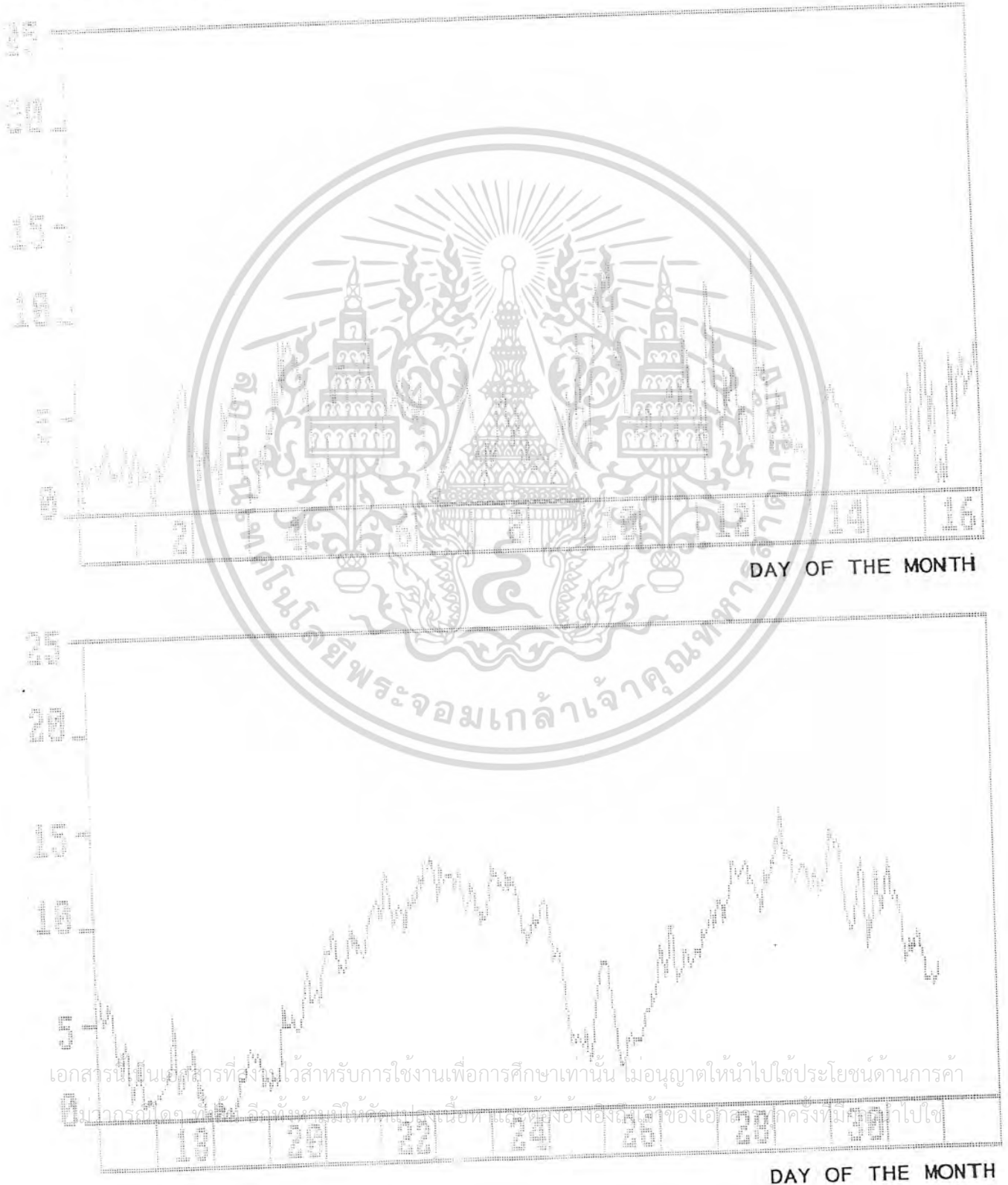
DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

JULY 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 มีวาทคดีโดย... ให้คำปรึกษาและให้คำปรึกษา... และ... ของเอกสาร... ครั้งหนึ่ง... ไปใช้

DAY OF THE MONTH

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

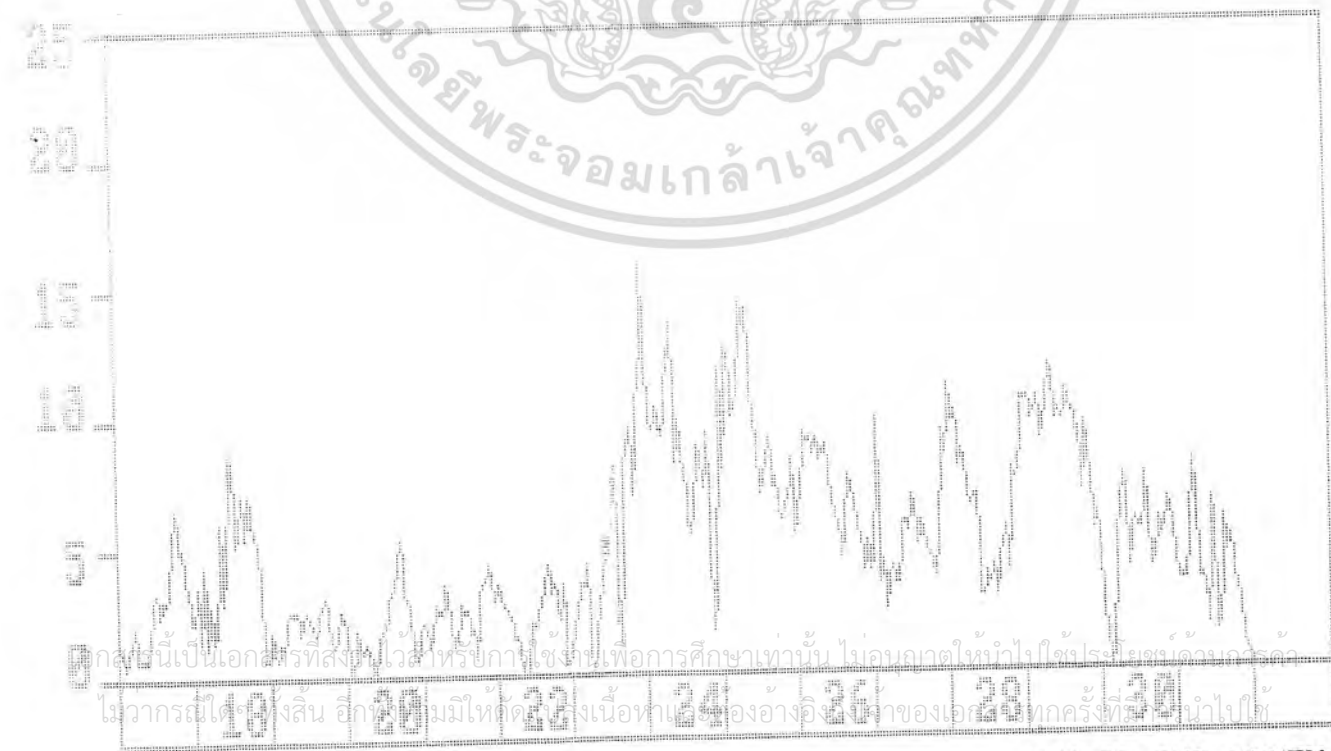
AUGUST 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH



DAY OF THE MONTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับราชการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ
 ใดวาทกรรมใดสิ่งหนึ่ง อีกครั้งหนึ่งมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำของเอกสารนี้ทุกครั้งที่นำไปใช้

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHEP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHEP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

SEPTEMBER 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
##
## Mean Wind Speed 7.6 m/s ##
## Standard Deviation of Wind Speeds 3.8 m/s ##
## Mean Turbulence Intensity 0.122 ##
## Mean Energy Speed 11.4 m/s ##
## Std. Deviation of Energy Distribution 2.7 m/s ##
## Mean Power Density 466 Watts/m2 ##
## Max. 1-hour Wind Speed on Day 27, 07:00 18.6 m/s WNW ##
## Max. 1-sec. Wind Speed N/A N/A ##
## Dominant Wind Energy Direction W ##
## Dominant Wind Speed Direction W ##
## Max. Daily Mean Speed on Day 27 12.8 m/s ##
## Min. Daily Mean Speed on Day 20 2.2 m/s ##
## Assumed Average Air Density 1.209 kg/m3 ##
## Energy Pattern Factor 1.75 ##
## Weibull Shape Factor, k 2.20 ##
## Weibull Scale Factor, c 8.6 m/s ##
## Speed Data Recovery 100.0 % ##
## Turbulence Intensity Data Recovery 99.6 % ##
## Direction Data Recovery 98.3 % ##
##
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



HOUR: 0 ออกสาร 2 สวม 4 สำหรับ 6 ใช้งาน 8 เพื่อ 10 ศึกษา 12 นั้น 14 นุญา 16 นำไป 18 ประ 20 ด้าน 22 คำ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

SEPTEMBER 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH



DAY OF THE MONTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOURLY WIND SPEED GRAPH

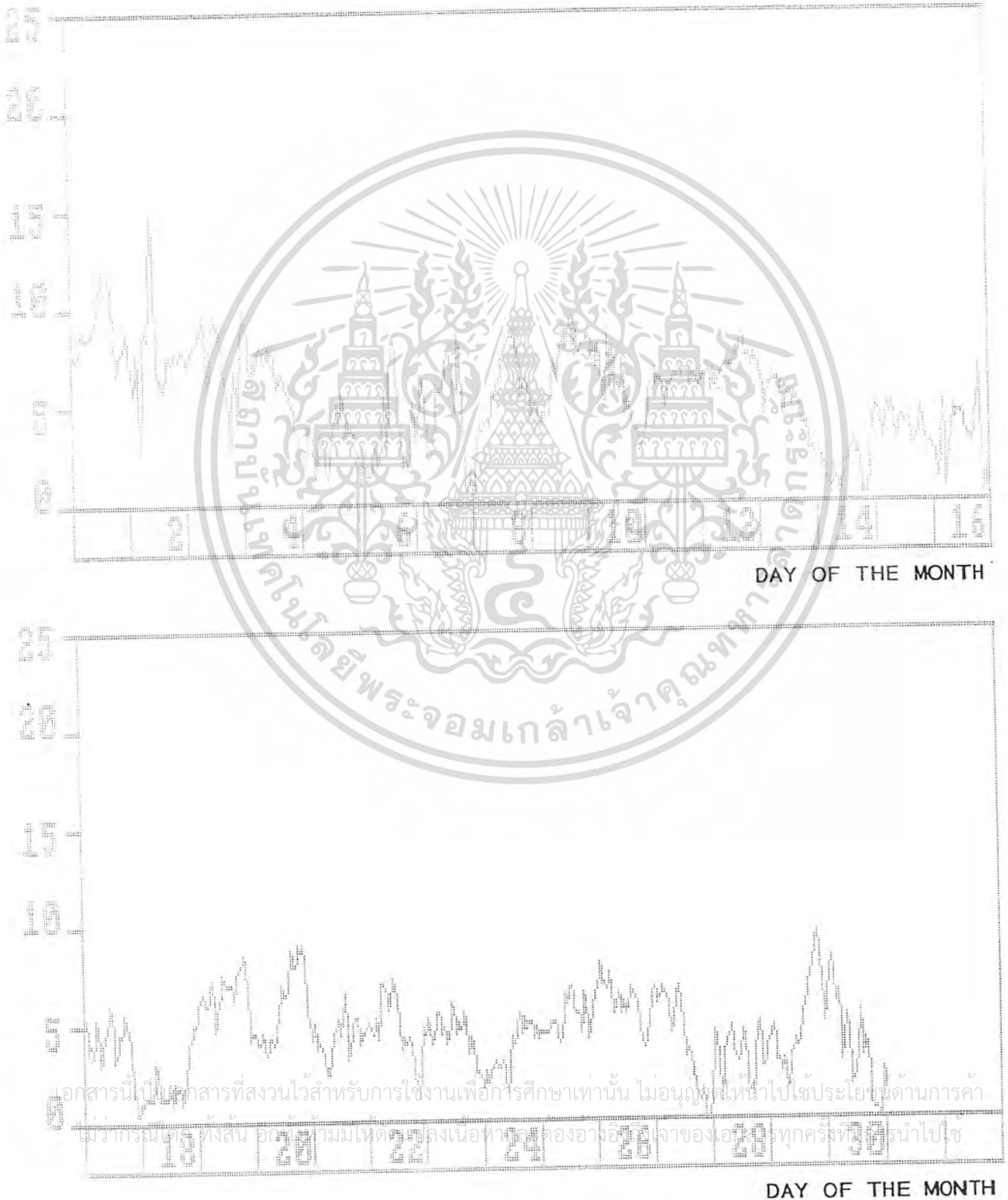
DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

NOVEMBER 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 แม้ว่าการเผยแพร่ทั้งสิ้น ออกมาจากรายงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามเอกสารของหน่วยงานนี้ยังคงสงวนไว้เพื่อใช้

DAY OF THE MONTH

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHERP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHERP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

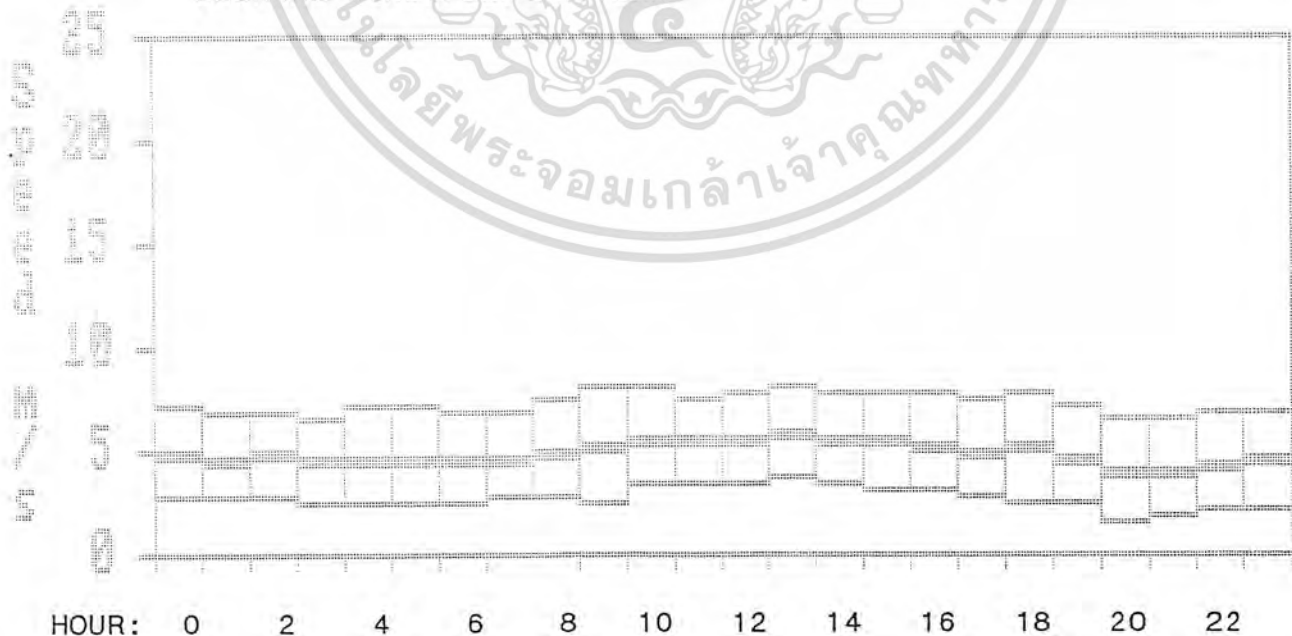
NOVEMBER 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
##
## Mean Wind Speed                5.0    m/s    ##
## Standard Deviation of Wind Speeds  2.3    m/s    ##
## Mean Turbulence Intensity        0.169          ##
## Mean Energy Speed                7.5    m/s    ##
## Std. Deviation of Energy Distribution  2.2    m/s    ##
## Mean Power Density                126    Watts/m2 ##
## Max. 1-hour Wind Speed on Day  2, 09:00  14.7   m/s    WNW  ##
## Max. 1-sec. Wind Speed          N/A          N/A  ##
## Dominant Wind Energy Direction          WNW  ##
## Dominant Wind Speed Direction          WNW  ##
## Max. Daily Mean Speed on Day  1          9.0    m/s    ##
## Min. Daily Mean Speed on Day  14         2.0    m/s    ##
## Assumed Average Air Density      1.209   kg/m3  ##
## Energy Pattern Factor            1.66          ##
## Weibull Shape Factor, k          2.35          ##
## Weibull Scale Factor, c          5.7    m/s    ##
## Speed Data Recovery              100.0   %      ##
## Turbulence Intensity Data Recovery  100.0   %      ##
## Direction Data Recovery          97.9   %      ##
##
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Program ว่าก WD-SMRY ลีน อีกทั้งทำ v3.30 แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิง Latest Revision ที่ 10 APR 92

SUMMARY WIND SPEED STATISTICS

DATA PROCESSING FOR: PROMTHEP ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
 Location.....PROMTHEP PHUKET
 Station Elevation.....80 M ASL
 Station Height.....36 M AGL
 Averaging Time.....1-HOUR

DECEMBER 1996
 STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
 Edit Level.....wind1996

```
#####
##
## Mean Wind Speed                1.9    m/s    ##
## Standard Deviation of Wind Speeds  1.2    m/s    ##
## Mean Turbulence Intensity        9.990                ##
## Mean Energy Speed                2.8    m/s    ##
## Std. Deviation of Energy Distribution  0.3    m/s    ##
## Mean Power Density                8      Watts/m2  ##
## Max. 1-hour Wind Speed on Day 1, 03:00  3.2    m/s    ENE    ##
## Max. 1-sec. Wind Speed          N/A                N/A    ##
## Dominant Wind Energy Direction                ENE    ##
## Dominant Wind Speed Direction                ENE    ##
## Max. Daily Mean Speed on Day 1        1.9    m/s    ##
## Min. Daily Mean Speed on Day 1        1.9    m/s    ##
## Assumed Average Air Density        1.209 kg/m3    ##
## Energy Pattern Factor              1.84                ##
## Weibull Shape Factor, k            2.08                ##
## Weibull Scale Factor, c            2.2    m/s    ##
## Speed Data Recovery                1.3    %    ##
## Turbulence Intensity Data Recovery    1.3    %    ##
## Direction Data Recovery            1.2    %    ##
##
#####
```

ABBREVIATIONS: ASL = Above Sea Level N/A = Not Applicable
 AGL = Above Ground Level STD = Standard Deviation
 ID = Insufficient Data --- = No Data

DIURNAL WINDSPEED PATTERN



HOUR: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Program WD-SMRY v3.30 Latest Revision 10 APR 92

HOURLY WIND SPEED GRAPH

DATA PROCESSING FOR: PROMTHER ALTERNATIVE ENERGY STATION

Project.....WIND ENERGY
Location.....PROMTHER PHUKET
Station Elevation.....80 M ASL
Station Height.....36 M AGL
Sampling Time.....1-HOUR

DECEMBER 1996
STATION 02

Date Printed.....16 MAR 98
Edit Level.....wind1996

WIND SPEED (m/s)



DAY OF THE MONTH



DAY OF THE MONTH

ภาคผนวก (ข)

การแปลงแกนอ้างอิง (Reference frame transformations)

1. แกนอ้างอิงหุคหนึ่ง abc ไปสู่แกนอ้างอิงหุคหนึ่ง $\alpha\beta$

แรงดัน:

$$v_\alpha = \sqrt{3}v_{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{bc}$$

$$v_\beta = \frac{3}{2}v_{bc}$$

กระแส:

$$i_\alpha = \frac{3}{2}i_a$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(i_b - i_c)$$

2. แกนอ้างอิงหุคหนึ่ง $\alpha\beta$ ไปสู่แกนอ้างอิงหมุน dq

แรงดัน และกระแส:

เมื่อต่อแบบสตาร์

$$v_d = \frac{3\sqrt{6}}{2}(v_\alpha \cos\theta - v_\beta \sin\theta)$$

$$v_q = \frac{3\sqrt{6}}{2}(v_\alpha \sin\theta + v_\beta \cos\theta)$$

$$i_d = \frac{3\sqrt{2}}{2}(i_\alpha \cos\theta - i_\beta \sin\theta)$$

$$i_q = \frac{3\sqrt{2}}{2}(i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต่อแบบเคลด้า

$$v_d = \frac{3\sqrt{2}}{2} (v_\alpha \cos\theta - v_\beta \sin\theta)$$

$$v_q = \frac{3\sqrt{2}}{2} (v_\alpha \sin\theta + v_\beta \cos\theta)$$

$$i_d = \frac{3\sqrt{6}}{2} (i_\alpha \cos\theta - i_\beta \sin\theta)$$

$$i_q = \frac{3\sqrt{6}}{2} (i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta)$$

เมื่อ θ หมายถึง ตำแหน่งมุมต่อแกนอ้างอิงหมุน dq



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบุคคลต่อไปนี้ ผู้ซึ่งมีส่วนร่วมในการทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

- คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้การอุปการะเลี้ยงดู
- ดร. วิจิตร กิณเรศ ที่ช่วยให้คำปรึกษาแนะนำ และเอื้อเพื่อเอกสารประกอบการทำปริญญานิพนธ์
- เพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเพื่อข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. พีรศักดิ์ วรสุนทร โรสถและณรงค์เดช ศรีอัสวอมร, “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าน้องนางเธอเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. กล้าณรงค์ โพธิ์แก้ว, สมพงษ์ วรชาติตระกูล, ไพโรจน์ วรชาติตระกูลและโกสินทร์ ลาสงยาง, “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม”, “ปริญญานิพนธ์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. Andrzej M. Trzynadloski, “The Field Orientation in Control Induction Motor”, Kluwer Academic, 255 p., 1994.
4. B.K.Bose, “Power Electronics and AC Drive”, Prentice Hall, 401 p., 1986.
5. Frank R. Eldridge, “Wind Machines”, Van Nostrand Reinhold, 214 p., 1980.
6. G.A. Smith and K.A.Kigim, “Wind energy recovery by a static scherbius induction generator”, IEE PROC., Vol.128, Pt.C, No.6, November 1981, pp.317-324.
7. Mohan ,Underland and Robbin, “Power Electronics:converter , application and design”, John wiley & Sons, 667 p., 1989.
8. Ruben S. Pena Gui nez, “Vector Control Strategies Doubly-fed Induction Generator Driven by a Wind turbine”, Thesis submitted to Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy.
8. R.S. Pena , J.C.Clare and G.M. Asher, “Doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converter and its application to variable-speed wind turbine generation”, IEE Proc.,Electr. Power Appl., Vol. 143., No. 3, May 1996, pp.231-241.
9. R.S. Pena , J.C.Clare and G.M. Asher, “Implement of vektor control strategies for a variable speed doubly-fed induction machine for wind generation system”, ENE'95 ,University of Nottingham, English, pp.75-79.
10. Sakae Yamamura, “Spiral Vector Theory of AC Circuit and Machines”, Clarendon Press, 132 p., 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้