สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

# แบบจำลองความถี่สูงของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

# High frequency models of an Induction motor stator winding

โดย

นายธีรนันท์ กูลเกื้อ

นายธีรวัฒน์ อภิเอกปฐม

นายไพศาล หวังทรัพย์ถวิล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....45951
วัน, เดือน, ปี.....26 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองความถี่สูงของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ


ผู้จัดทำ

1. นายธีรนันท์ กูลเกื้อ
2. นายธีรวัฒน์ อภิเอกปฐม
3. นายไพศาล หวังทรัพย์ถวิล


อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร)


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# แบบจำลองความถี่สูงของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

นายธีรนันท์ กูลเกื้อ
นายธีรวัฒน์ อภิเอกปฐม
นายไพศาล หวังทรัพย์ถวิล

**บทคัดย่อ**

งานชิ้นนี้นำเสนอ Time Domain Models อันขึ้นกับความถี่สำหรับอินดัคชั่นมอเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ค่าอิมพีแดนซ์เดิมในวงจรสมมูลของอินดัคชั่นมอเตอร์จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยอยู่บนพื้นฐานของ Foster's reactance ตามทฤษฎีการสังเคราะห์ระบบโครงข่าย เพื่อสังเคราะห์ค่าอิมพิแดนซ์ที่แปรผันตามความถี่ (Frequency Dependence Impedances) ตามต้องการ Time Domain Synthesis ของค่าอิมพีแดนซ์อันขึ้นกับความถี่ ของขดลวด Winding ได้ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบจำลอง บนพื้นฐานของการทำ Time Domain Model ตามหลักการในการหาค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งสามเฟสซึ่งขึ้นกับความถี่ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# High frequency models of an Induction motor stator winding

Theeranun Koonkeaur
Teerawat Apieakpathom
Phaisan Wangsubtawin

**Abstract**

This thesis presents high frequency dependent time domain models for induction Motor using the MATLAB program. The impedance in the conventional equivalent circuit of Induction motors are modified. This is based on Foster's reactance, a concept from network synthesis theory, to obtain the required frequency dependence. The time domain synthesis of the frequency dependent resistance of the winding is modelled. This is based on time domain modelling of frequency dependent three-phase transmission line impedance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| สารบัญ | III |
| สารบัญภาพ | V |
| สารบัญตาราง | X |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาของปัญหา | 1 |
| 1.1.1 ปัญหาที่เกิดจากการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน | 1 |
| 1.1.2 ปัญหาที่เกิดจากการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ Power Electronic | 2 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงาน | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงาน | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น | 5 |
| 2.1 บทนำ | 5 |
| 2.1.1 Random Coils and Form Coil Windings [7] | 5 |
| 2.1.2 ผลตอบสนองตามความถี่(Frequency Response)[8] | 6 |
| 2.1.2.1 การตอบสนองของแอมพลิจูด และ เฟส | 6 |
| 2.1.2.2 เรโซแนนซ์ (Resonance) | 9 |
| 2.1.3 การกระจายของแรงดันบนขดลวดจาก step function voltage surge | 10 |
| 2.1.4 ปรากฏการณ์ผิว(skin effect)[11] | 11 |
| 2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 14 |
| 2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ | 15 |
| 2.2.2 วงจรสมมูล Synthetic Circuit | 17 |
| 2.2.3 วงจรสมมูลของ Shunt Admittance | 19 |
| 2.2.4 วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance | 20 |
| บทที่ 3 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 2 แรงม้า | 24 |
| 3.1 การทดลองเพื่อหาวงจรสมมูล | 24 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 3.1.1 ผลการทดลอง 2 แรงม้า(Hp) โดย V-I method | 24 |
| 3.1.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST | 24 |
| 3.1.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST | 25 |
| 3.2 การทดลองเพื่อหาวงจรสังเคราะห์(Synthetic Circuit) | 26 |
| 3.3 ผลที่ได้จากการวัดค่า admittance และ phase angle | 28 |
| 3.4 ผลที่ได้จาก Frequency Dependence Resistance | 30 |
| 3.5 เปรียบผลที่ได้จากวัดและการคำนวณโดยทฤษฎี | 34 |
| บทที่ 4 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลองของ Motor 1 แรงม้า | 38 |
| 4.1 การทดลองเพื่อหาวงจรสมมูล | 38 |
| 4.1.1 ผลการทดลอง 2 แรงม้า(Hp) โดย V-I method | 38 |
| 4.1.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST | 38 |
| 4.1.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST | 39 |
| 4.2 การทดลองเพื่อหาวงจรสังเคราะห์(Synthetic Circuit) | 40 |
| 4.3 ผลที่ได้จากการวัดค่า admittance และ phase angle | 42 |
| 4.4 ผลที่ได้จาก Frequency Dependence Resistance | 44 |
| 4.5 เปรียบผลที่ได้จากวัดและการคำนวณโดยทฤษฎี | 47 |
| บทที่ 5 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 0.5 แรงม้า | 51 |
| 5.1 การทดลองเพื่อหาวงจรสมมูล | 51 |
| 5.1.1 ผลการทดลอง 2 แรงม้า(Hp) โดย V-I method | 51 |
| 5.1.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST | 51 |
| 5.1.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST | 52 |
| 5.2 การทดลองเพื่อหาวงจรสังเคราะห์(Synthetic Circuit) | 53 |
| 5.3 ผลที่ได้จากการวัดค่า admittance และ phase angle | 55 |
| 5.4 ผลที่ได้จาก Frequency Dependence Resistance | 57 |
| 5.5 เปรียบผลที่ได้จากวัดและการคำนวณโดยทฤษฎี | 60 |
| บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ | 64 |
| กิตติกรรมประกาศ | 66 |
| เอกสารอ้างอิง | 67 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ


| | หน้า |
|---|---|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| รูปที่1.1 รูปแสดงวงจรการตัดต่ออย่างง่าย | 1 |
| รูปที่1.2 รูปคลื่นแรงดันของการต่อวงจร | 1 |
| รูปที่1.3 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ได้จากการตัวต่อวงจร | 2 |
| รูปที่1.4 รูปแสดงการกระจายของ Spectrum ของสัญญาณตามความถี่ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น | |
| รูปที่2.1(a) ภาพหน้าตัด 2 ด้านของขดลวด Random ในส่วนปิดของสเตเตอร์สล็อต | 5 |
| รูปที่2.1(b) ภาพหน้าตัด 2 ด้านของขดลวด Form ในส่วนเปิดของสเตเตอร์สล็อต | 5 |
| ปที่2.2 วงจรขนาน RLC | 7 |
| รูปที่2.3 (a) แอมพลิจูด และ (b) เฟสของการตอบสนองของสมการ 2.7 | 8 |
| รูปที่2.4 การกระจายแรงดันเริ่มต้นบนขดลวดสม่ำเสมอ ในการตอบสนองกับ step function voltage surge | |
| (a)นิวตรอนต่อกราวน์ | 10 |
| (b)นิวตรอนไม่ต่อกราวน์ | 10 |
| รูป2.5 ตัวนำบนแกนZ | 11 |
| รูป2.6 \| H \| ต่อ r ภายในตัวนำ | 11 |
| รูป2.7 ฟลักซ์เกี่ยวคล้องกระแส | 11 |
| รูปที่2.8 skin depth | 13 |
| รูปที่2.9โมเดลซึ่งขึ้นกับความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ[4] | 14 |
| รูปที่2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ[1] | 15 |
| รูปที่2.11 วงจรที่ใช้ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3-เฟส ทางด้าน Stator winding | 16 |
| รูปที่2.12 วงจรที่ใช้ทดสอบ V-I method | 17 |
| รูปที่2.13 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดค่า Series Impedance | 18 |
| รูปที่2.14 วงจรขนาน RLC | 18 |
| รูปที่2.15 Shunt Admittance Measurement | 20 |
| รูป 2.16 วงจรสมมูล Shunt Admittance | 20 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ(ต่อ)


หน้า

รูปที่2.17 วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance 21

รูปที่2.18 The frequency dependent resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 21

บทที่ 3 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 2 แรงม้า

รูปที่3.1 รูปวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 25

รูปที่3.2 ผลการวัด series impedance ของในขดลวด มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่ 26

รูปที่3.3 ผลการวัดมุมเฟส $\theta(Z)$ ของ series impedance ในขดลวด มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่ 26

รูปที่3.4 วงจรสมมูล Synthetic Circuit ที่คำนวณได้ 27

รูปที่3.5 ผลการวัดค่า shunt admittance ของขดลวด มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับกับความถี่ 28

รูปที่3.6 ผลการวัดค่ามุมเฟสของ admittance ในขดลวด มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 28

รูปที่3.7 วงจรสมมูล Shunt Admittance ที่คำนวณได้ 29

รูปที่3.8 ค่า Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 30

รูปที่3.9 ค่ามุมเฟสของ Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 30

รูปที่3.10 วงจรสมมูล Frequency Dependence Resistance 33

รูปที่3.11 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบกับค่าที่วัด 34

รูปที่3.12 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 34

รูปที่3.13 มุมของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 35

รูปที่3.14 ค่า มุม ของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 35

รูปที่3.15 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้ จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) 36


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ(ต่อ)


หน้า

รูปที่3.16 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 36

รูปที่3.17 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) 37

รูปที่3.18 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 37

บทที่ 4 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 1 แรงม้า

รูปที่4.1 รูปวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 39

รูปที่4.2 ผลการวัด series impedance ของในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่ 40

รูปที่4.3 ผลการวัดมุมเฟส $\theta(Z)$ ของ series impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่ 40

รูปที่4.4 วงจรสมมูล Synthetic Circuit ที่คำนวณได้ 41

รูปที่4.5 ผลการวัดค่า shunt admittance ของขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับกับความถี่ 42

รูปที่4.6 ผลการวัดค่ามุมเฟสของ admittance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 42

รูปที่4.7 วงจรสมมูล Shunt Admittance ที่คำนวณได้ 43

รูปที่4.8 ค่า Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 44

รูปที่4.9 ค่ามุมเฟสของ Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 44

รูปที่4.10 วงจรสมมูล Frequency Dependence Resistance 46

รูปที่4.11 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบกับค่าที่วัด 47

รูปที่4.12 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 47

รูปที่4.13 มุมของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 48


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่4.14 ค่า มุม ของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ 48
(synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance
แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด
รูปที่4.15 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้ 49
จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)
รูปที่4.16 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ 49
(synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance
แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด
รูปที่4.17 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้ 50
จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)
รูปที่4.18 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ 50
(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance
แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด
บทที่ 5 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 0.5 แรงม้า
รูปที่5.1 รูปวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 52
รูปที่5.2 ผลการวัด series impedance ของในขดลวด 53
มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่
รูปที่5.3 ผลการวัดมุมเฟส $\theta(Z)$ ของ series impedance ในขดลวด 53
มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่
รูปที่5.4 วงจรสมมูล Synthetic Circuit ที่คำนวณได้ 54
รูปที่5.5 ผลการวัดค่า shunt admittance ของขดลวด 55
มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับกับความถี่
รูปที่5.6 ผลการวัดค่ามุมเฟสของ admittance ในขดลวด 55
มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่
รูปที่5.7 วงจรสมมูล Shunt Admittance ที่คำนวณได้ 56
รูปที่5.8 ค่า Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 57
รูปที่5.9 ค่ามุมเฟสของ Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่ 57
รูปที่5.10 วงจรสมมูล Frequency Dependence Resistance 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่5.11 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบกับค่าที่วัด 60

รูปที่5.12 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 60

รูปที่5.13 มุมของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 61

รูปที่5.14 ค่า มุม ของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 61

รูปที่5.15 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้ จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) 62

รูปที่5.16 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 62

รูปที่5.17 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้ จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) 63

รูปที่5.18 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


หน้า

บทที่ 1 บทนำ

ตารางที่1.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานในภาคเรียนที่1 3

ตารางที่1.2 แสดงขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานในภาคเรียนที่2 4

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น

ตาราง2.1 ค่า skin depth ของทองแดง 13

ตาราง2.2 ตารางแสดงค่า Reactance ของ Motor class ต่างๆ 17

บทที่ 3 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 2 แรงม้า

ตารางที่3.1 ผลการทดลองโดย V-I method 24

ตารางที่3.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST 24

ตารางที่3.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST 25

บทที่ 4 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 1 แรงม้า

ตารางที่4.1 ผลการทดลองโดย V-I method 38

ตารางที่4.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST 38

ตารางที่4.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST 39

บทที่ 5 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 0.5 แรงม้า

ตารางที่5.1 ผลการทดลองโดย V-I method 51

ตารางที่5.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST 51

ตารางที่5.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST 52


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

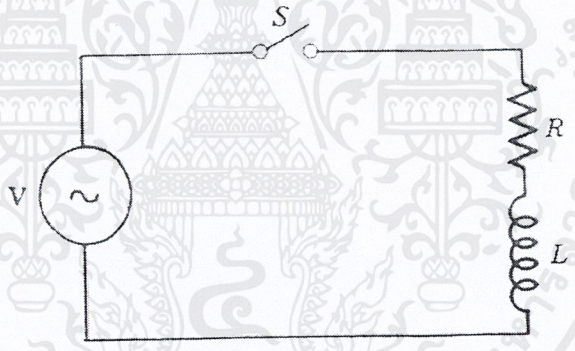
# บทที่1

## บทนำ

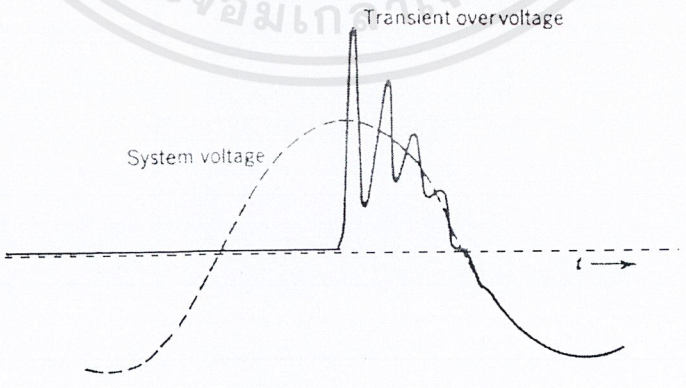
### 1.1 ที่มาของปัญหา

ปัญหาจาก Step-front transient over voltage ในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำอันเนื่องมาจากการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น circuit breaker หรือการ switching ในอุปกรณ์ power electronic สร้างความเสียหายให้กับขดลวดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โครงงานนี้ได้มุ่งความสนใจไปที่ขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวชนิด random wound ซึ่งใช้ระบบ แรงดันไฟฟ้าต่ำ โดยเราสร้างแบบจำลองขึ้นมาสนับสนุนการทำนายรูปคลื่นของ transient over voltage เพื่อใช้หาระบบการป้องกันที่เหมาะสม

1.1.1 ปัญหาที่เกิดจากการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน



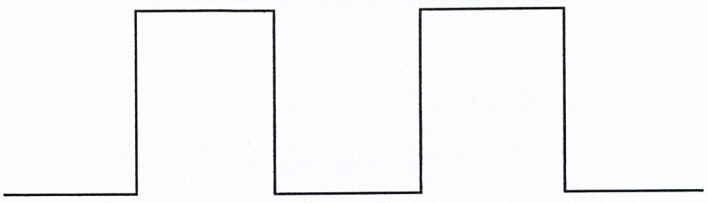

รูปที่1.1 รูปแสดงวงจรการตัดต่ออย่างง่าย




รูปที่1.2 รูปคลื่นแรงดันของการต่อวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.2 ปัญหาที่เกิดจากการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ Power Electronic



รูปที่1.3 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ได้จากการตัดต่อวงจร

รูปที่1.4 รูปแสดงการกระจายของ Spectrum ของสัญญาณตามความถี่

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้าง Model ที่ขึ้นกับความถี่ของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษาว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดพิกัดของ Motor ไป Model ของขดลวดสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร
3. เพื่อศึกษาผลจาก skin effect ของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 1.3 ขอบเขตของงาน

ภาคเรียนที่ 1

1. ทดสอบหาค่าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 แรงม้า
2. ศึกษา และ ออกแบบวงจรสมมูล Synthetic Circuit
3. ศึกษา และ ออกแบบวงจรสมมูลของ Shunt Admittance
4. ศึกษา และ ออกแบบ วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance
5. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากการวัดกับผลของการ simulate จาก Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคเรียนที่ 2

1. ทดสอบ หา ค่าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 0.5 แรงม้า และ 1 แรงม้า
2. ศึกษา และ ออกแบบวงจรสมมูล Synthetic Circuit
3. ศึกษา และ ออกแบบวงจรสมมูลของ Shunt Admittance
4. ศึกษา และ ออกแบบ วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance
5. วิเคราะห์เปรียบเทียบผลของการวัดกับผลการsimulateจากmodel
6. พัฒนาโปรแกรมโดยสามารถเลือกเปลี่ยนค่าอินพุทได้อัตโนมัติเมื่อเปลี่ยนพิกัดมอเตอร์

**1.4 ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงาน**

| | เมษายน | พฤษภาคม | มิถุนายน | กรกฎาคม | สิงหาคม | กันยายน | ตุลาคม |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| รวบรวมข้อมูล | ← | → | | | | | |
| กำหนดขอบเขตของงาน | | ← | → | | | | |
| เก็บผล,ศึกษาข้อมูล | | | ← | → | → | | |
| ศึกษาโปรแกรม MATLAB | | | | ← | → | → | |
| วิเคราะห์ข้อมูล, คำนวณหา Model | | | | | ← | → | |
| เขียนโปรแกรมการคำนวณ | | | | | | ← | → |
| พัฒนาโปรแกรม | | | | | | | ← → |

ตารางที่1.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานในภาคเรียนที่1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | พฤศจิกายน | ธันวาคม | มกราคม | กุมภาพันธ์ | มีนาคม |
|---|---|---|---|---|---|
| รวบรวมข้อมูล | ← → | | | | |
| เก็บผล,ศึกษาข้อมูล | ← → | ← → | | | |
| พัฒนาโปรแกรม | | ← → | ← → | ← → | |
| วิเคราะห์ข้อมูล, สรุปผล | | | ← → | ← → | ← → |

ตารางที่1.2 แสดงขั้นตอนการศึกษาและดำเนินงานในภาคเรียนที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

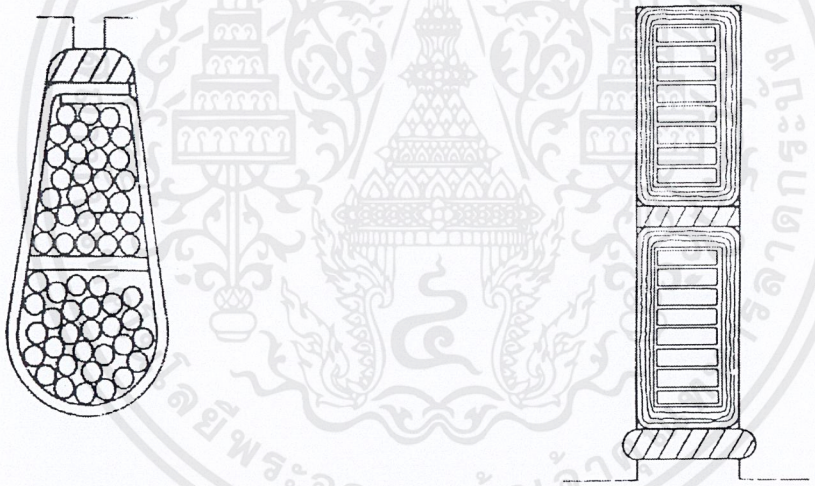
# บทที่ 2

# ทฤษฎีเบื้องต้น

## 2.1 บทนำ

2.1.1 Random Coils and Form Coil Windings [7]

ขดลวดสเตเตอร์ ถูกแบ่งออกเป็น แบบ Random และ แบบ Form การแบ่งทั่วไปคือส่วนบนของสล็อตที่ทำการคล้องขดลวดเป็นส่วนแบบปิด หรือเป็นส่วนที่เปิด ขดลวดแบบRandom นั้นใช้กับส่วนที่ปิดของสล็อต ขดลวดชนิดRandomใช้กับ Machine ที่มีขนาดเล็กกว่า มีพิกัดกำลังที่ต่ำกว่า และพิกัดแรงดันสเตเตอร์ 600 โวลต์ หรือต่ำกว่านี้ ขดลวดแบบ Form จึงถูกใช้กับ Machine ที่มีขนาดใหญ่กว่าพิกัดกำลังสูงกว่าและมีพิกัดแรงดันสูงกว่า 600 โวลต์



a b

รูปที่2.1(a) ภาพหน้าตัด 2 ด้านของขดลวด Random ในส่วนปิดของสเตเตอร์สล็อต

(b) ภาพหน้าตัด 2 ด้านของขดลวด Form ในส่วนเปิดของสเตเตอร์สล็อต

ปลายรอบของการพันแบบ Randomไม่สามารถยึดเพื่อต้านแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตามต้องการ เหมือนกับปลายรอบของขดลวดแบบ Form โดยแรงจับยึดดังกล่าวมีความสัมพันธ์ที่ไม่สอดคล้องกับความยาวปลายรอบและขนาดพิกัดกำลังของ Machine ดังนั้น บางสิ่งจึงถูกพิจารณาใหม่เช่น เมื่อเพิ่มขนาด Machine สามารถออกแบบเปลี่ยนแปลงจากการพันแบบ Random เป็นการพันแบบ Formเพราะผลจากการพิจารณาแรงยึดดังกล่าว ดังนั้นแม้ว่าการฉนวนแบบ Random อันเดียวกันนี้เพียงพอทั้งหมด สำหรับแรงดันสเตเตอร์ที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพิกัดกำลังที่ต่ำกว่า จุดนี้ต้องพิจารณาอีกครั้งเพราะการพิจารณาขนาดพิกัด ในการเปลี่ยนจากการพันแบบ Random เป็นแบบฟอร์มนั้น จะทำให้แรงดันและ พิกัดกำลังเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนการพันโดยปกติทำที่แรงดันสเตเตอร์ขนาด 600 โวลต์ และพิกัดกำลังปกติของ Machine ที่แรงดันดังกล่าว

2.1.2 ผลตอบสนองตามความถี่(Frequency Response)[8]

ความสัมพันธ์ที่มีโดเมนความถี่มีประโยชน์มาก ดังที่ทราบเพื่อการหา ฟังก์ชันโดเมนเวลาที่ตรงกัน การตอบสนองทางความถี่ของวงจรมีประโยชน์อย่างยิ่งโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากเราสนใจในความถี่ใดที่มีอิทธิพลในสัญญาณขาออก เรียกว่า $|V(jw_1)|$ จากนั้นเราพิจารณา $|V(jw)|$ เพียงขนาดความถี่ใดมีความสัมพันธ์กับ $|V(jw)|$ ที่มีขนาดมากและความถี่ตรงที่สัมพันธ์กับแอมปลิจูดขนาดเล็ก

มีการประยุกต์ใช้งานมากมาย ในสิ่งที่การตอบสนองทางความถี่มีความสำคัญ สิ่งหนึ่งที่เป็นการใช้งานเป็นปกติ คือการออกแบบอิเล็กทริคฟิวเตอร์ เป็นวงที่ส่งผ่านสัญญาณเฉพาะความถี่และกันสัญญาณที่ความถี่อื่นๆ ถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณขาออกของฟิวเตอร์คือ $|V(jw)|$ ดังนั้น สัญญาณจะผ่านถ้า $|V(jw_1)|$ มีขนาดใหญ่ และสัญญาณจะถูกกันหากแอมพิจูด $|V(jw)|$ มีขนาดเล็ก

2.1.2.1 การตอบสนองของแอมพลิจูด และ เฟส

$H(j\omega)$ เป็นฟังก์ชั่นของวงจร เป็นปริมาณทางเฟสเซอร์ซึ่งโดยทั่วไปเป็นฟังก์ชั่นจำนวนเชิงซ้อน มีส่วนจริงและส่วนจินตภาพดังนี้

$$H(j\omega) = ReH(j\omega) + jI_mH(j\omega) \text{ ---------- 2.1}$$

ดังที่ทราบเราจะเขียนความสัมพันธ์ของเน็ตเวิร์ก(network)อยู่ในรูปโพล่าร์(polar form)

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|\ell^{j\phi(\omega)} \text{ ---------2.2}$$

เมื่อ $H(j\omega)$ เป็นแอมพลิจูด ของการตอบสนองและ

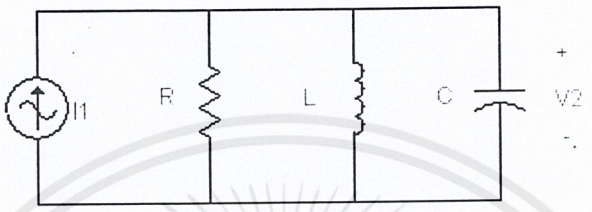
$\phi(\omega)$ เป็นเฟสการตอบสนองให้ค่าทั้งสองดังกล่าวโดย

$$|H(j\omega)| = \sqrt{R^2eH(j\omega) + I_m^2H(j\omega)} \text{ ----------2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi(\omega) = tan^{-1} \frac{I_m H(j\omega)}{Re\, H(j\omega)} \quad \text{----------2.4}$$

**แอมพลิจูดและเฟสของการตอบสนองเป็นกรณีพิเศษ ของการตอบสนองทางความถี่ ฟังก์ชันเน็ตเวิร์กของวงจรขนาน RLC ในรูปที่2.2 เป็นอินพุท อิมพีแดนซ์**




รูปที่2.2 วงจรขนาน RLC

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{I_1(s)} = Z(s) = \frac{1}{(1/R) + sC + (1/sL)} \quad \text{----------2.5}$$

หรือ

$$H(s) = \frac{(1/C)s}{s^2 + (1/RC)s + (1/LC)} \quad \text{----------2.6}$$

สำหรับ $s = j\omega$ จากสมการ2.5 ได้

$$H(j\omega) = \frac{1}{(1/R) + j[\omega C - (1/\omega L)]} \quad \text{----------2.7}$$

ดังนั้นการตอบสนองของแอมพลิจูดและเฟส คือ

$$\left| H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1/R^2) + [\omega C - (1/\omega L)]^2}} \right| \quad \text{----------2.8}$$

$$\phi(w) = -\tan^{-1} R\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \quad \text{----------2.9}$$

เมื่อ R, L และ C เป็นค่าคงที่ ค่าแอมพลิจูดสูงสุด ปรากฏที่ค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

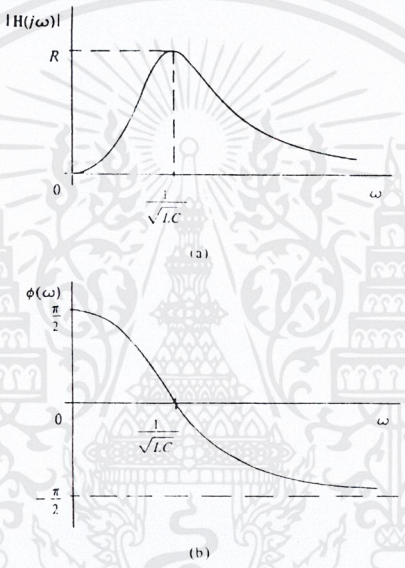
เมื่อตัวหารในสมการ 2.8 ต่ำสุด ปรากฏชัดเมื่อ

$$\omega C - \frac{1}{\omega L} = 0 \qquad \text{หรือ} \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{----------2.10}$$

ดังนั้น

$$|H(j\omega)_{max}| = |H(j\omega_0)| = R$$

ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่า $|H(j\omega)| \rightarrow 0$ ที่ $\omega \rightarrow 0$ และที่ $\omega \rightarrow \alpha$ ดังนั้นการตอบสนองของแอมพลิจูดมีรูปแบบแสดงในรูปที่2.3 (a) ในทำนองเดียวกันเราจะสเกต(sketch) การตอบสนองของเฟส แสดงในรูป 2.3 (b) เมื่อ $\phi(\omega) = 0$




รูปที่2.3 (a) แอมพลิจูด และ (b) เฟสของการตอบสนองของสมการ 2.7

เมื่อ

$$\phi(\omega) \rightarrow \pi/2 \text{ ที่ } \omega \rightarrow 0 \text{ และ } \phi(\omega) \rightarrow -\pi/2 \text{ เมื่อ } \omega \rightarrow \alpha$$

ถ้าสัญญาณอินพุทของรูป2.2 เป็นฟังก์ชันโดเมนเวลา

$$i_1(t) = I_m \cos \omega t$$

เฟเซอร์ของสัญญาณอินพุทคือ $I_1 = I_m \angle o^\circ$ และเฟเซอร์ของสัญญาณเอาท์พุทคือ

$$V_2 = I_m Z = I_m H$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแอมพลิจูดของเอาท์พุทเป็นฟังก์ชันเน็ตเวิร์กคูณกับค่าคงที่โดยเราจะได้รับข้อมูลเหมือนกันจากเน็ตเวิร์กฟังก์ชันและจากการตอบสนองของเอาท์พุท

2.1.2.2 เรโซแนนซ์ (Resonance)

เรานิยามการกระตุ้นเน็ตเวิร์กโดยไซน์ เพื่อเกิดเรโซแนนซ์ ณ จุดที่แอมพลิจูดของเน็ตเวิร์กฟังก์ชันถึงค่าสูงสุดหรือต่ำสุดโดยเด่นชัด ความถี่ที่ปรากฏถูกเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ ตัวอย่างวงจรขนาน RLC ในรูป2.2 เกิดเรโซแนนซ์เมื่อความถี่ของฟังก์ชันการขับเป็น $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ โดยถูกแสดงในหัวข้อการตอบสนองของแอมพลิจูดและเฟส ค่าแอมพลิจูดของฟังก์ชันเน็ตเวิร์กสูงสุดเกิดที่ $\omega_0$ การตอบสนองของแอมพลิจูดในรูป2.3 (a) แสดงลักษณะที่มีความสัมพันธ์กันของค่าสูงสุดที่ความถี่
เรโซแนนซ์

ในวงจรขนาน RLC เราควรหมายเหตุไว้ว่าเน็ตเวิร์กฟังก์ชันในสมการ2.5 จริง ๆ เป็นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ความถี่เรโนแนนซ์ $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ คือความถี่ที่อินพุทอิมพีแดนซ์มีเพียงส่วนจริง ดังในสมการ2.7 ในความเป็นจริงผู้แต่งหลายท่านนิยามความถี่เรโซแนนซ์เจาะจงแบบนี้ในกรณีของ 2 เทอร์มินอลเน็ตเวิร์ก ส่วนกรณีทั่วไปแอมพลิจูดสูงสุด ไม่ได้ปรากฏเฉพาะเจาะจงที่ความถี่ของส่วนจริงของอิมพีเดนซ์เสมอไป แต่ปกติจะเกิดต่างออกไปเล็กน้อย ณ ตำแหน่งเรโซแนนซ์จะไม่มีผลกระทบขององค์ประกอบสะสมพลังงาน(reactance) จะมองเห็นเพียงความต้านทาน(pure resistance)

2.1.3 การกระจายของแรงดันบนขดลวดที่มีผลมาจาก step function voltage surge

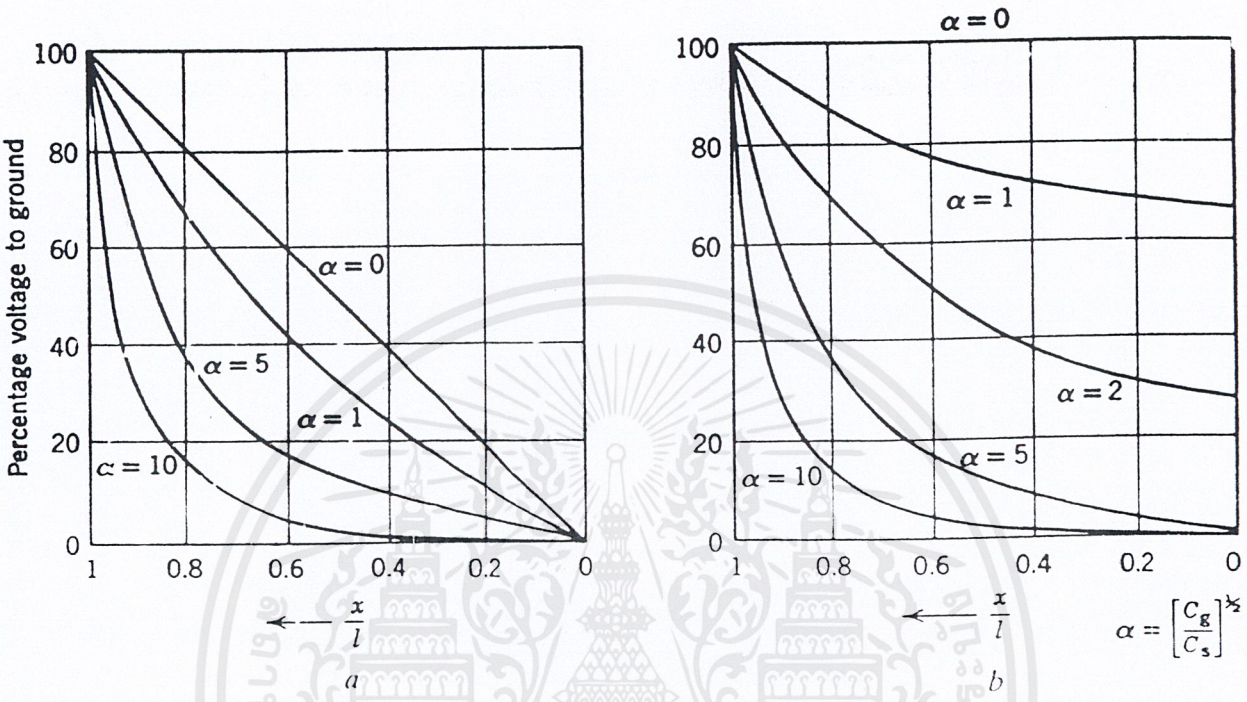
Step function surge เป็น surge ที่มีผลรุนแรงที่สุดและใกล้เคียงในทางปฏิบัติ ตัวอย่าง เช่น chopped wave นอกจากนี้รูปคลื่นอื่นๆจะประมาณการโดยการบวกกันของ step function ทั้งสองเครื่องหมายและหลายขนาดของ step function โดยประกอบด้วยย่านความถี่ที่ไม่สิ้นสุด
ในกรณีนิวตรอน (nuetral) ต่อกราวน์

$$E = \frac{V \sinh(\alpha . x/l)}{\sinh \alpha} \text{ ----------2.11}$$

ในกรณีนิวตรอน (nuetral) ถูกแยก

$$E = \frac{V \cosh(\alpha x/l)}{\cosh \alpha} \text{ ----------2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



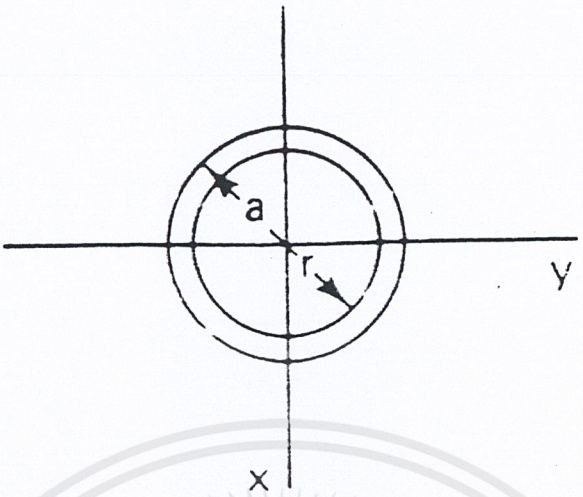

รูปที่2.4 การกระจายแรงดันเริ่มต้นบนขดลวดสม่ำเสมอ
ในการตอบสนองกับ step function voltage surge
(a)นิวตรอนต่อกราวน์ (b)นิวตรอนไม่ต่อกราวน์

ภายใต้ภาวะการณ์ที่มีเสิร์จ ฉนวนระหว่างรอบที่ปลายสายของขดลวดมีความเค้นรุนแรงมาก เมื่อเหตุผลนี้ถูกค้นพบครั้งแรก ใช้อธิบายว่าทำไมหม้อแปลงโดยมากได้รับความเสียหายโดยเบรกดาวน์ของฉนวนในตำแหน่งนี้

2.1.4 ปรากฏการณ์ผิว(skin effect)[11]

ขณะกระแสตรงไหลในตัวนำ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแส (J) แอมแปร์ต่อตารางเมตรคงที่บนหน้าตัดของตัวนำ จากกฎ Ampere's circulate พบสนามแม่เหล็ก H ภายในตัวนำตามทางเดินที่รัศมี a เมตรและ r เมตร ดังรูป 2.5 ตัวนำมีจุดศูนย์กลางบนแกน Z กระแสกำลังไหลเข้าสู่หน้ากระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



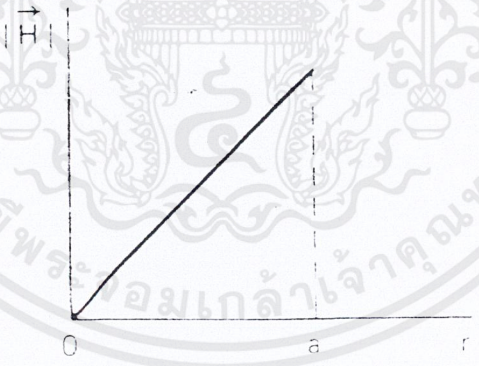

รูป2.5 ตัวนำบนแกนZ

$$\oint Hdl = I_{linked}$$

$$H\,2pi * r = J(area) = (I / pia^2)(pir^2)$$

$$H = \frac{rI}{2pia^2}; r <= a$$

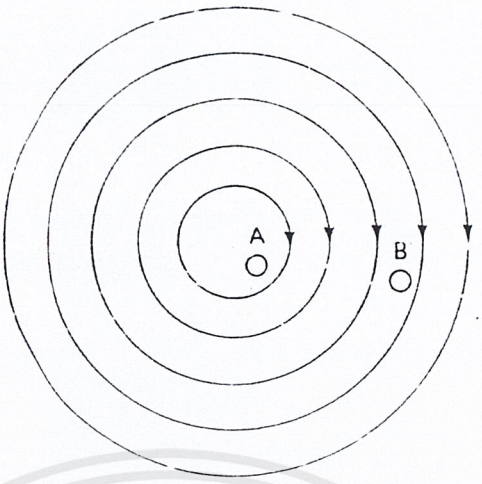
ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสมการเส้นตรงแสดงในรูป 2.6




รูป2.6 | H | ต่อ r ภายในตัวนำ

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กHเป็นศูนย์ที่จุดศูนย์กลางตัวนำและมีค่าสูงสุดที่ผิวหน้า เส้นฟลักซ์แม่เหล็กรวมเกี่ยวคล้องกระแสภายในตัวนำ กระแสที่ไหลบริเวณศูนย์กลาง มีเส้นฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องมากกว่ากระแสที่ไหลใกล้ผิวหน้าตัวนำแสดงในรูป 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป2.7 ฟลักซ์เกี่ยวคล้องกระแส

องค์ประกอบ A และ B มีพื้นที่หน้าตัดเดียวกันและค่าความหนาแน่นของกระแส (J) คงที่กระแสใน A ถูกเกี่ยวคล้องโดยฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่ากระแสปริมาณเท่ากันใน B ความเหนี่ยวนำของ A จึงมากกว่าของ B และมีค่ารีแอคแตนซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดันตกคร่อมสายต่อหน่วยความยาวนั้นเท่ากันและค่าความเหนี่ยวนำที่จุดศูนย์กลางตัวนำมีค่ามาก และน้อยลงเมื่อเข้าสู่ผิวหน้า กระแสมีการกระจายตัวใหม่โดยกระแสมีค่าน้อย และรีแอกแตนซ์มีค่ามาก เมื่อเข้าใกล้ศูนย์กลางของตัวนำ และตรงกันข้ามกระแสจะมีค่ามาก และรีแอกแตนซ์มีค่าน้อย เมื่อเข้าใกล้บริเวณผิวหน้าตัวนำ

เรานิยามปริมาณ$\delta$ เป็นค่า “skin depth” หรือความลึกในการแทงเข้าไปในผิวตัวนำโดย

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ ----------2.13}$$

มองที่ค่าความถี่ (f) ของทองแดง จาก

$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$ $\sigma = 5.8*10^{7}$ โมห์ต่อเมตร

$\mu = 4\pi*10^{-7}$ เฮนรี่ต่อเมตร

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f (4\pi*10^{-7})(5.8*10^{7})}}$$

$$= \frac{0.06608}{\sqrt{f}} \text{ เมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราสร้างตารางขึ้นมาได้เห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่า $\delta$ (skin depth) จะน้อยลง

| Frequence(Hz) | $\delta$ (Meters) | $\delta$ (Centimeters) | $\delta$ (Millimeters) |
|---|---|---|---|
| 60 | $8.53*10^{-3}$ | 0.85 | 8.53 |
| 1,000 | $2.089*10^{-3}$ | 0.2089 | 2.089 |
| $1*10^{6}$ | $66.085*10^{-6}$ | $6.6*10^{-3}$ | 0.066 |
| $100*10^{6}$ | $6.608*10^{-6}$ | $660.8*10^{-6}$ | $6.6*10^{-3}$ |
| $1{,}000*10^{6}$ | $2.089*10^{-6}$ | $208.9*10^{-6}$ | $2.08*10^{-3}$ |

ตาราง2.1 ค่า skin depth ของทองแดง

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของกระแสที่ศูนย์กลางตัวนำน้อยมาก เมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสที่ผิวหน้า สมมุติว่าเราเข้าไปอยู่ในตำแหน่งรัศมีเท่ากับ r ในตัวนำ โดย r เท่ากับรัศมีตัวนำลบด้วย skin depth

$$r = a - \delta \text{ ----------2.14}$$

รูปที่2.8 skin depth

จากการคำนวณค่าความหนาแน่นของกระแส ตำแหน่งที่ลึก $\delta$ เมตร จากผิวหน้าตัวนำ มีค่าความหนาแน่นของกระแสประมาณ 1ใน10 ของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวตัวนำ และมีกระแสน้อยมากที่กำลังไหล ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของตัวนำในสภาวะความถี่สูง จึงเป็นการประมาณค่าที่ดี โดยสมมุติว่าทั้งหมดไหลในวงแหวนที่มีความหนา $\delta$ ดังรูป2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{a.c.} = \rho\frac{l}{A} \text{----------2.15}$$

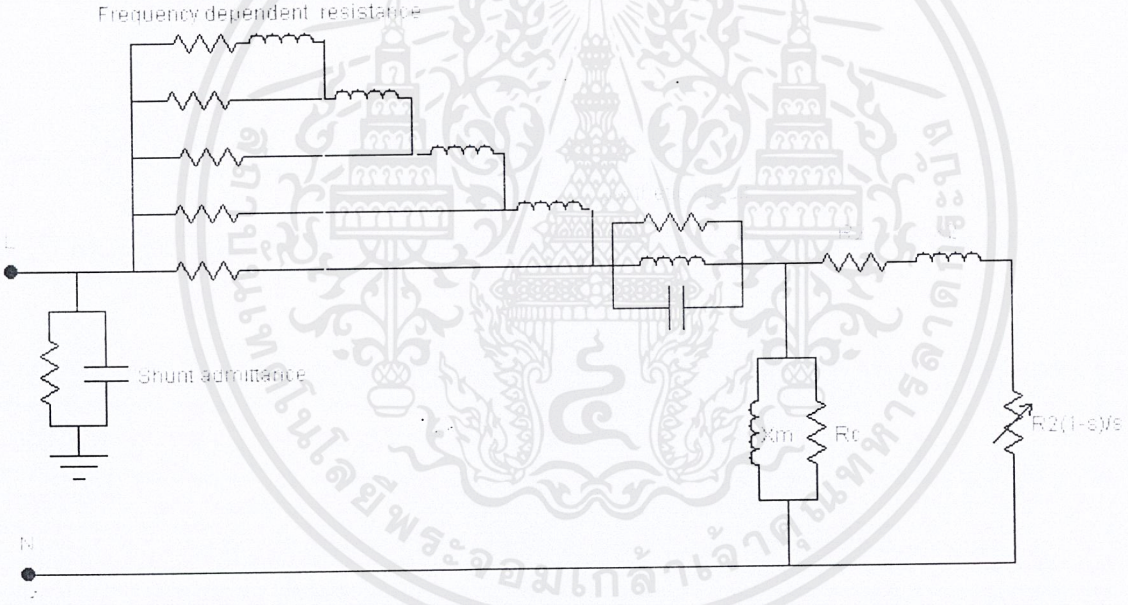
$$\cong \rho\frac{l}{2\pi a\delta}$$

$$R_{d.c.} = \rho\frac{l}{\pi a^2} \text{----------2.16}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{R_{a.c.}}{R_{d.c.}} \cong \rho\frac{l}{2\pi a\delta} \Big/ \rho\frac{l}{\pi a^2}$$

$$\cong \frac{a}{2\delta} \text{----------2.17}$$

**2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ**




รูปที่2.9โมเดลซึ่งขึ้นกับความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ[4]

โดยแบ่งวงจรสมมูลออกเป็นส่วนประกอบด้วยกัน 4 ส่วน คือ

ส่วนที่1 หา Equivalent Circuit ของ Induction motor แบบ approximate

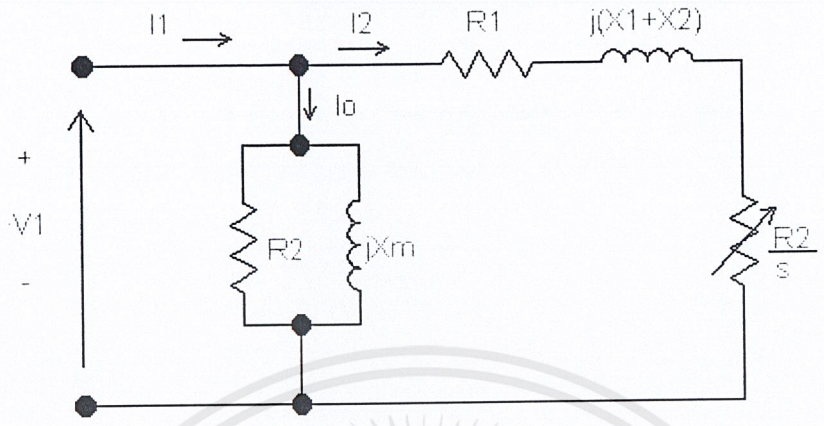
ส่วนที่2 หา Synthetic Circuit หาจากการวิเคราะห์ค่า impedance ด้วยเครื่อง Impedance Analyzer

ส่วนที่3 หา Shunt Admittance จากการวัดค่า แอดมิดแตนต์ ด้วยเครื่อง impedance analyzer

ส่วนที่4 หา Frequency dependence resistance model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 วงจรสมมูลที่หาได้จาก No Load Test, Block Rotor Test และ V-I Method




รูปที่2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ[1]

เมื่อ $X_1$: Stator leakage reactance

$X_2$: Rotor leakage reactance transfer to stator

$R_1$: Stator resistance

$R_2$: Rotor resistance transfer to stator

$R_{fix}$: Fix-loss resistance

$X_m$: Magnetizing resistance

$S = (N_s - N_r)/N_s$

$I_\varphi = I_c + I_m = V_1/R_{fix} + V_1/j X_m$

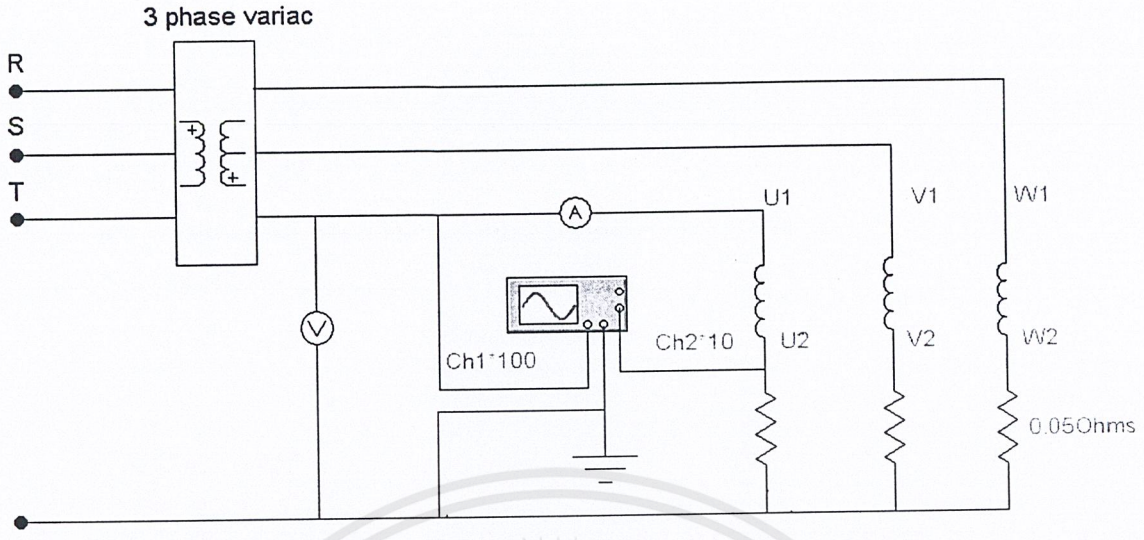
$I_1 = I_2 + I_\varphi$

$I_2 = V_1/((R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2))$

$P_g = 3. \left| I_2 \right| 2 . R_2/s$

$T_e = P_g // \omega_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่2.11 วงจรที่ใช้ทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3-เฟส ทางด้าน Stator winding

No-load test

$R_{fix} = V_0 / ( I_0 \text{Cos } \varphi )$

$X_m = V_0 / (I_0 \text{ Sin } \varphi_0 )$

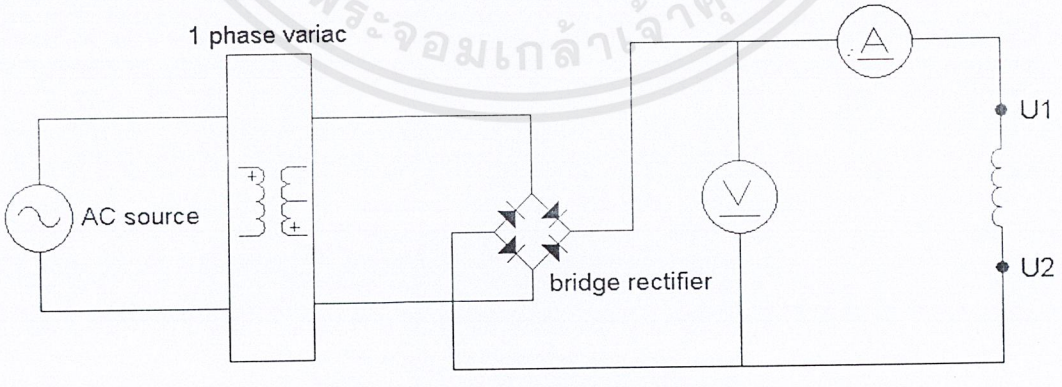
Block rotor test

$Z_b = V_b / I_b \angle - \varphi_b$

$= R_b + j X_b$

$R_b = R_1 + R_2$

$X_b = X_1 + X_2$




รูปที่2.12 วงจรที่ใช้ทดสอบ V-I method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



หาค่า R1 จาก V-I method test

$R_1 = V/I$

$R_2 = R_b - R_1$

Empirical Distribution of leakage reactance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

| | | Fraction of X1 + X2 | |
|---|---|---|---|
| Motor class | Description | X1 | X2 |
| A | Normal starting torque, normal starting current | 0.5 | 0.5 |
| B | Normal starting torque, low starting current | 0.4 | 0.6 |
| C | High starting torque, low starting current | 0.3 | 0.7 |
| D | High starting torque, High slip | 0.5 | 0.5 |

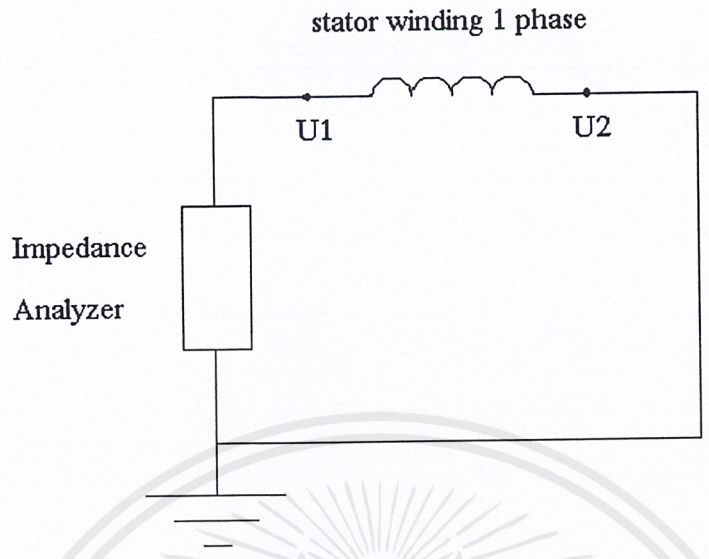
ตาราง2.2 ตารางแสดงค่า Reactance ของ Motor class ต่างๆ

2.2.2 วงจรสมมูล Synthetic Circuit

วงจรสมมูล Synthetic Circuit ของ ขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำได้จากการพิจารณา การตอบสนองทางความถี่โดยการวัดค่า series impedance ของขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเครื่อง impedance analyzer HP 4194A โดยต่อปลายทั้งสองด้านของขดลวดสเตเตอร์ 1 เฟสเข้ากับเครื่อง impedance analyzer ดังแสดงในรูปที่2.13 และปล่อยลอยปลายของขดลวด 2 เฟสที่เหลือ ค่าอิมพิแดนซ์ และ มุมเฟส ที่ได้จากการวัดของขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ความถี่ต่างๆ

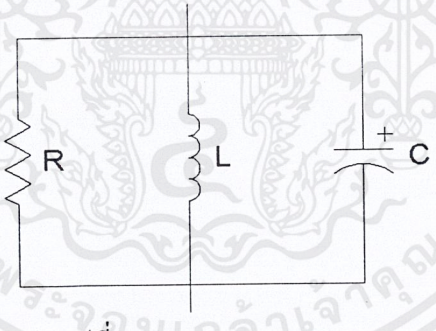
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45951




รูปที่2.13 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดค่า Series Impedance

ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรสังเคราะห์นั้นได้จากค่าเฉลี่ยของส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ที่ทำการวัดโดยเครื่อง Impedance analyzer ค่าความจุทางไฟฟ้าคำนวณขึ้นโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำและค่าความถี่เรโซแนนซ์ ดังสมการ




รูปที่2.14 วงจรขนาน RLC

$$Z = \frac{1}{(1/R) + j(\omega C - 1/\omega L)} \quad \text{----------2.18} \qquad , Z_{\max} = R$$

$$|Z(j\varpi)| = \frac{1}{\sqrt{(1/R)^2 + [\omega C - (1/\omega L)]^2}} \quad \text{----------2.19} \qquad , \theta = \tan^{-1} R(\omega C - 1/\omega L)$$

ค่าแอมปลิจูดของ Z จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ

$$\therefore \omega C - (1/\omega L) = 0 \quad ,$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = 1/(4\pi^2 f_0^2 L) \text{ ----------2.20}$$

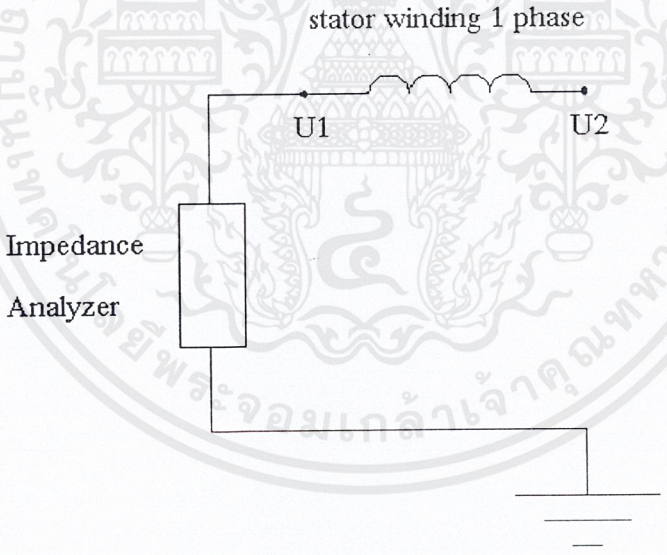
เมื่อ C: ค่าความจุทางไฟฟ้าในวงจรสังเคราะห์ L-C

L: ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรสังเคราะห์ L-C

$F_o$: ความถี่เรโซแนนซ์

2.2.3 วงจรสมมูลของ Shunt Admittance

วงจรสมมูลของ Shunt Admittance เราพิจารณาจากการวัดค่า แอดมิดแตนต์ ด้วย เครื่อง Impedance Analyzer โดยวิธีการ Open Circuit Stator Winding, Shunt Admittance ถูกเพิ่มในวงจรสังเคราะห์ เพื่อสร้างส่วนของความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดและกราวนด์ เป็นตัวแทนของค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดและกราวนด์ ค่าของความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด ในการวัดการตอบสนองทางความถี่ของแอดมิดแตนต์ ได้ทำการวัดระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (ส่วนเปลือกนอกของมอเตอร์) โดยทำการ Open Circuit Winding ดังรูป




รูปที่2.15 Shunt Admittance Measurement

ค่า แอดมิดแตนต์ และมุมเฟสที่วัดได้นี้เรานำไป คำนวณหาค่า G และ B เฉลี่ยตามสมการดังนี้

$$Y = G + jB$$

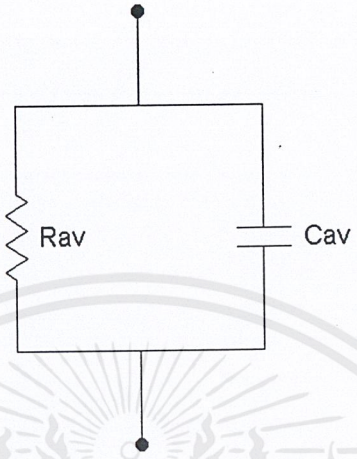
$$G = Y \cos(\theta_y)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$B = Y \sin(\theta_y)$

$R = 1/G$

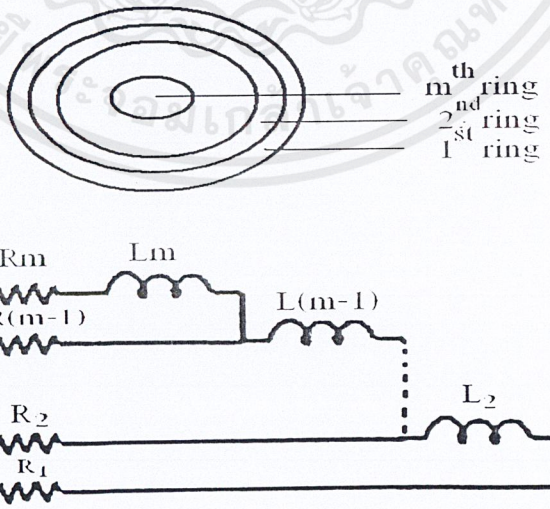
$Xc = 1/B$




รูป 2.16 วงจรสมมูล Shunt Admittance

2.2.4 วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance

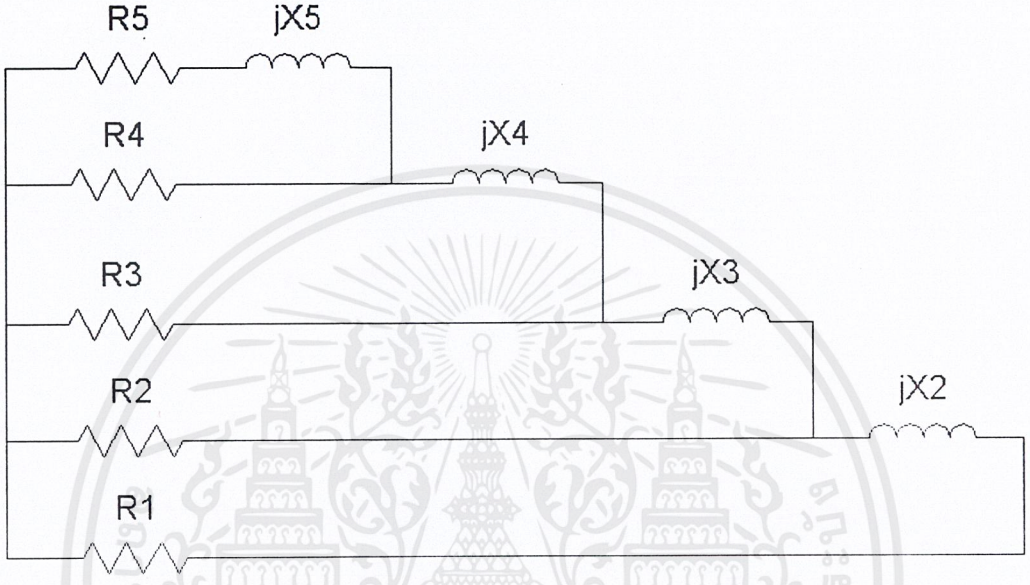
วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance หาโดยการใช้หลักการ Time Domain Modeling of Frequency Dependence Three Phase Transmission line Impedance [6] ความต้านทานอันขึ้นกับความถี่ใน Time Domain Analysis ของค่าความสูญเสียในสายส่งวิธีการนี้เราแบ่ง cable ออกเป็น ชั้น(layer) โดยแต่ละ layer แสดงค่าที่เหมาะสมของการต่ออนุกรมความต้านทานและความเหนี่ยวนำ




รูปที่2.17 วงจรสมมูลของ Frequency Dependence Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบด้วยวิธี V-I Method เราทราบค่า Rdc ของ Stator winding และจากทฤษฎีของ Chu-Sue Yen [10] สมมุติแบ่ง cable ออกเป็น 5 layer โดยเราจะเลือกใช้อัตราส่วนของความต้านทานที่ layer ด้านนอกเป็น 2 เท่าของความต้านทานที่ layer ด้านใน ในการคำนวณของค่าความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรค่าความต้านทานความถี่สูงของสาย cable ที่พิจารณาของผลของ skin effect




รูปที่2.18 The frequency dependent resistance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$R_i = \frac{\rho l}{A_i}, \rho = 1.672 * 10^{-8}$$

$$L_i = \frac{\mu(r_{i-1} - r_i)}{2\pi r_i}$$

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A_{total}} (i = 1,2,3,4,5); \rho = 1.672 * 10^{-8}$$

$r_1$ : *from measurement*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตรที่ใช้คำนวณหา Frequency Dependent Resistance</u>

กำหนด $\rho_{cu} = 1.672*10^{-8}$ ,$\mu_{cu} = 1$ และจากการวัด Winding $r_1 = 0.04025$ mm

จาก V-I method $R_{dc} = 4.688\ \Omega$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{\rho l}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}}{\frac{\rho l}{\pi(r_2^2 - r_3^2)}} = \frac{(r_2^2 - r_3^2)}{(r_1^2 - r_2^2)} = \frac{A_2}{A_1} = 2$$

$$\frac{R_2}{R_3} = 2 = \frac{(r_3^2 - r_4^2)}{(r_2^2 - r_3^2)} = \frac{A_3}{A_2}$$

$$\frac{R_3}{R_4} = 2 = \frac{(r_4^2 - r_5^2)}{(r_3^2 - r_4^2)} = \frac{A_4}{A_3}$$

$$\frac{R_4}{R_5} = 2 = \frac{(r_5^2)}{(r_4^2 - r_5^2)} = \frac{A_5}{A_4}$$

ให้ $A_1 = a$

$A_2 = 2a$

$A_3 = 4a$

$A_4 = 8a$

$A_5 = 16a$ ,$A_5 = \pi r_5^2$

$$total\ area\ of\ winding = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 31a$$

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A_{total}} = \frac{\rho l}{31a} = \frac{\rho l}{\pi r_1^2}$$

$$R_5 = \frac{\rho l}{16a} = \frac{\rho l}{\pi r_5^2}; \frac{R_{dc}}{R_5} = \frac{16a}{31a} = \frac{\pi r_5^2}{\pi r_1^2} = (\frac{r_5}{r_1})^2$$

$$R_i = \frac{\rho l}{A_i}(i = 1,2,3,4,5); \rho = 1.672*10^{-8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{r_1}{r_5} = \sqrt{\frac{16}{31}} \qquad , r_5 = \sqrt{\frac{16}{31}} * r_1 \quad : find\ r_5$$

$$\frac{A_5}{A_4} = \frac{\pi r_5^2}{\pi(r_4^2 - r_5^2)} = 2 \quad , r_5^2 = 2r_4^2 - 2r_5^2 \qquad , r_4 = \sqrt{\frac{3r_5^2}{2}} \quad : find\ r_4$$

$$\frac{A_4}{A_3} = \frac{\pi(r_4^2 - r_5^2)}{\pi(r_3^2 - r_4^2)} = 2 \quad , (r_4^2 - r_5^2) = 2r_3^2 - 2r_4^2 \qquad , r_3 = \sqrt{\frac{3r_4^2 - r_5^2}{2}} : find\ r_3$$

$$\frac{A_3}{A_2} = \frac{\pi(r_3^2 - r_4^2)}{\pi(r_2^2 - r_3^2)} = 2 \quad , (r_3^2 - r_4^2) = 2r_2^2 - 2r_3^2 \qquad , r_2 = \sqrt{\frac{3r_3^2 - r_4^2}{2}} : find\ r_2$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi(r_2^2 - r_3^2)}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} = 2 \quad , (r_2^2 - r_3^2) = 2r_1^2 - 2r_2^2 \qquad , r_1 = \sqrt{\frac{3r_2^2 - r_3^2}{2}} : find\ r_1$$

$$FROM \quad L_i = \frac{\mu(r_{i-1} - r_i)}{2\pi r_i}$$

$$L_2 = \frac{\mu(r_1 - r_2)}{2\pi r_2}$$

$$L_3 = \frac{\mu(r_2 - r_3)}{2\pi r_3}$$

$$L_4 = \frac{\mu(r_3 - r_4)}{2\pi r_4}$$

$$L_5 = \frac{\mu(r_4 - r_5)}{2\pi r_5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่3

## วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor 2 แรงม้า

### 3.1 การทดลองเพื่อหาวงจรสมมูลโดยวิธี No Load Test, Block Rotor Test, V-I Method

3.1.1 ผลการทดลอง 2 แรงม้า(Hp) โดย V-I method

| ค่า | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| V | 10 | 14 | 18 | 23 | 28 |
| I | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| R | 5 | 4.67 | 4.5 | 4.6 | 4.67 |

ตารางที่3.1 ผลการทดลองโดย V-I method

$R1 = (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)/ 5$

$R1 = (5+4.67+4.5+4.6+4.67)/5$

$= 4.688\ \Omega$

$Zb = Vb / Ib \angle -\varphi b = 70/ 3.8 \angle -61.2^{\circ} = 18.42 \angle 61.2^{\circ}$

$Rb = 18.42 \cos 61.2^{\circ} = 8.87\ \Omega$

$Xb = 18.42 \sin 61.2^{\circ} = 16.14\ \Omega$

$R2 = Rb - R1$

$R2 = 8.87-4.69 = 4.18\ \Omega$

$J (X1+X2) = Xb$

จากตาราง2.2 Empirical Distribution of leakage reactance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ class A

$X1 = X2 = 0.5Xb = 16.14/2 = 8.07\ \Omega$

3.1.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST

CH1 Volt/div = 10 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

CH2 Volt/div = 0.1 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 1

| Vo | Io | $\phi o$ |
|---|---|---|
| 220 V | 2.55 A | $86.4^{\circ}$ |

ตารางที่3.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

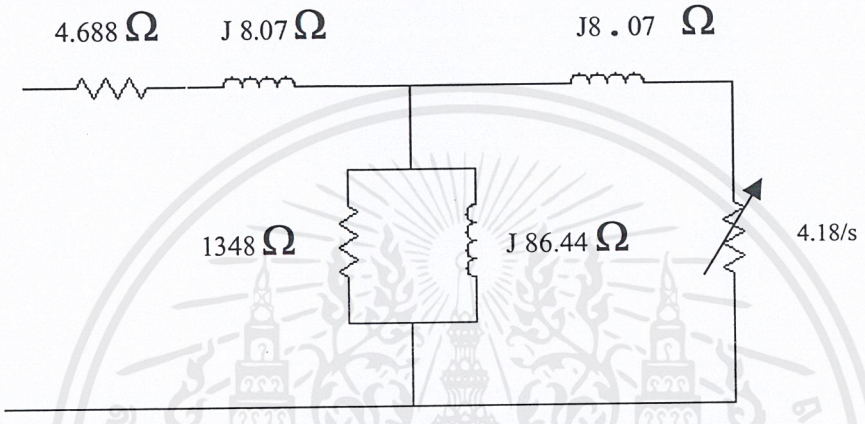
### 3.1.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST

CH1 Volt/div = 10 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

CH2 Volt/div = 0.1 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

| Vb | Ib | $\phi b$ |
|---|---|---|
| 70 V | 3.8 A | $61.2^{\circ}$ |

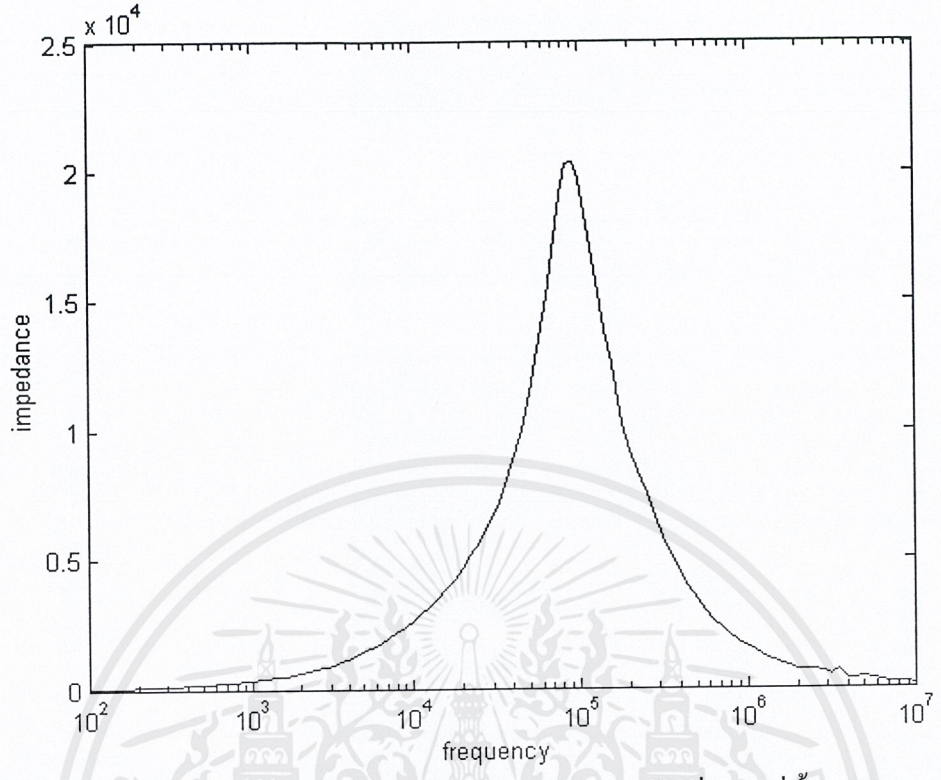
ตารางที่3.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST



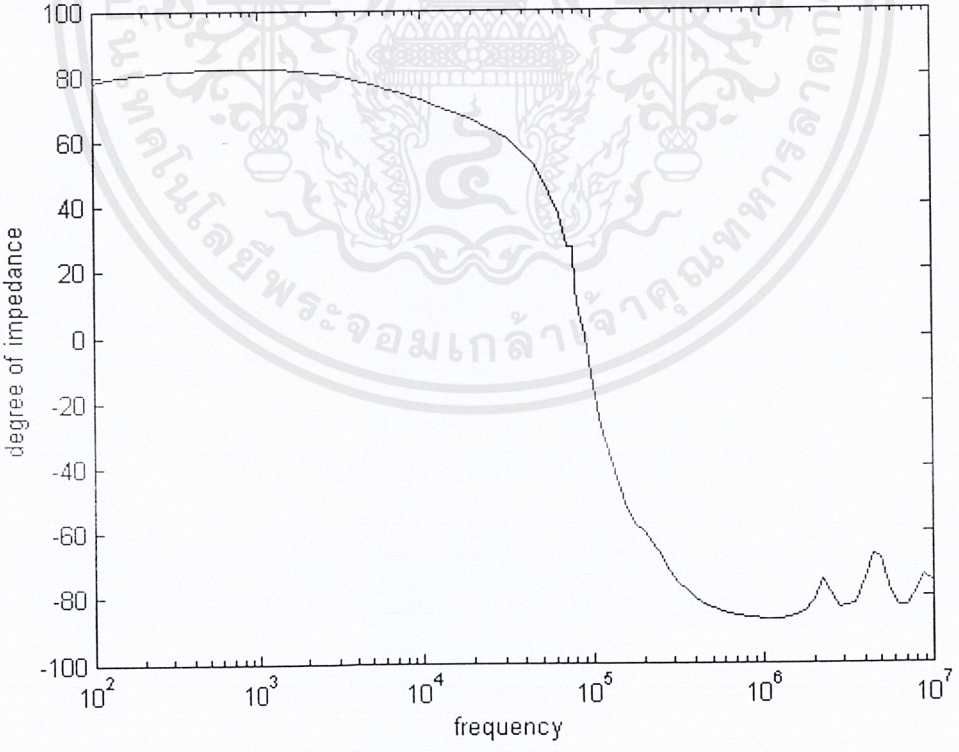

รูปที่3.1 รูปวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทดลองเพื่อหาวงจรสังเคราะห์(Synthetic Circuit)




รูปที่3.2 ผลการวัด series impedance ของในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่

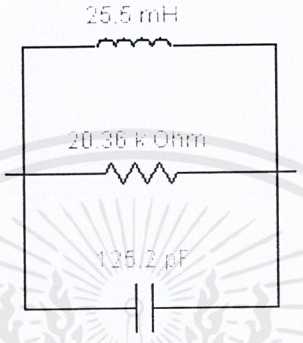



รูปที่3.3 ผลการวัดมุมเฟส $\theta(Z)$ ของ series impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของ L-C ขนานของ Fosters circuits[9] ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ equivalent circuit ที่มีการตอบสนองความถี่เช่นเดียวกันให้กับขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำดังกล่าว โดยครอบคลุมย่านความถี่ 100 Hz ถึง 10MHz จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ3.3 เกิด resonance 1 จุด ที่ความถี่ 89.125 kHz ดังนั้นจึงสร้าง L-C circuit เพียง 1 วงจร

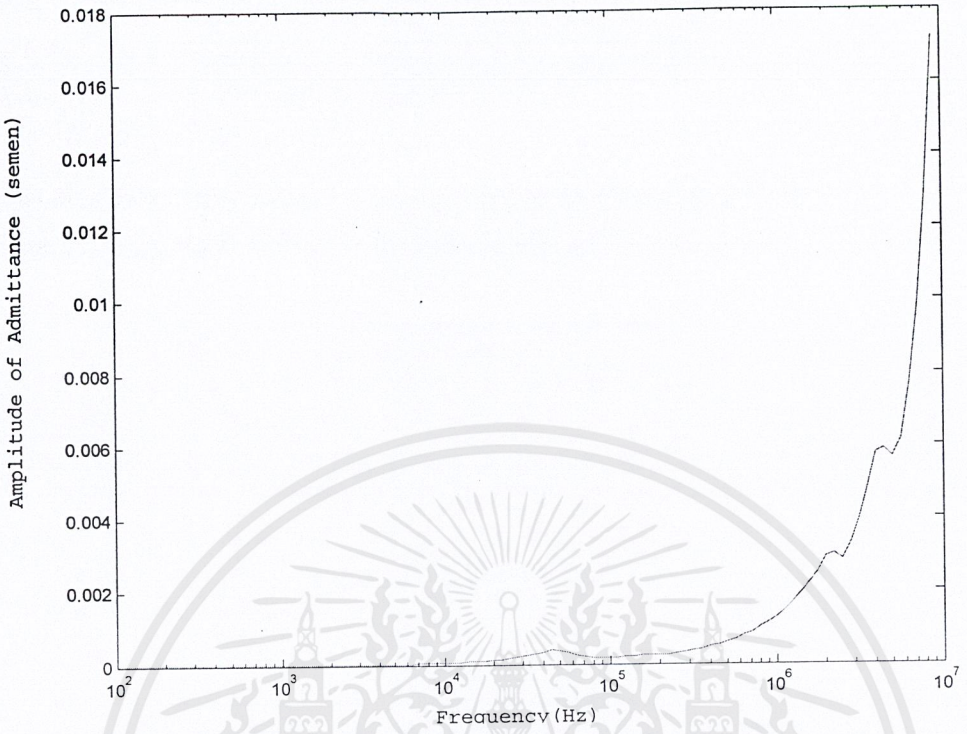
ค่าความต้านทานที่ถูกต่อขนานในวงจรสังเคราะห์ L-C ได้มาจากค่าค่าความต้านทานได้จากส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรสังเคราะห์ได้แสดง ดังรูป



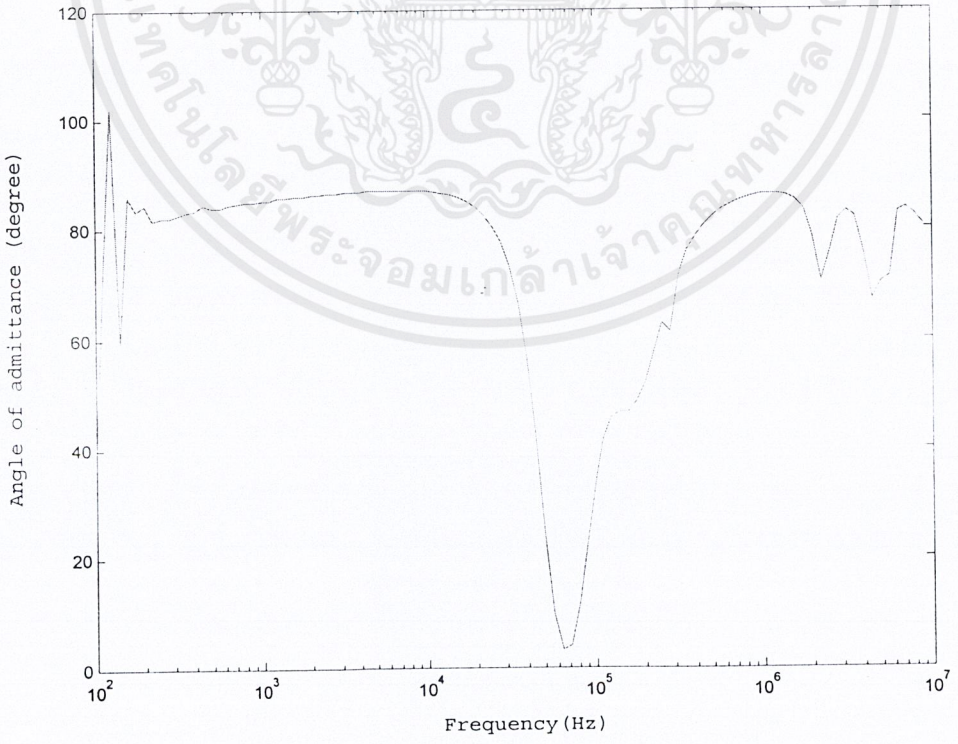

รูปที่3.4 วงจรสมมูล Synthetic Circuit ที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ผลที่ได้จากการวัดค่า admittance และ phase angle โดยเครื่อง impedance analyzer

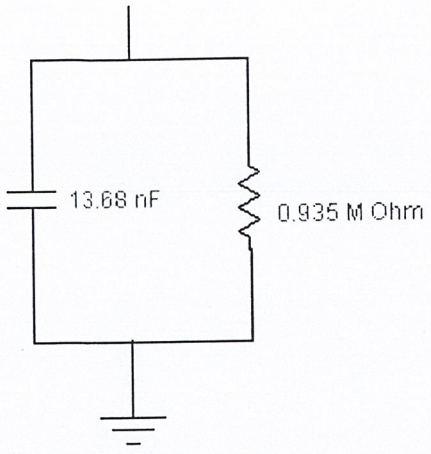



รูปที่3.5 ผลการวัดค่า shunt admittance ของขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับกับความถี่




รูปที่3.6 ผลการวัดค่ามุมเฟสของ admittance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่

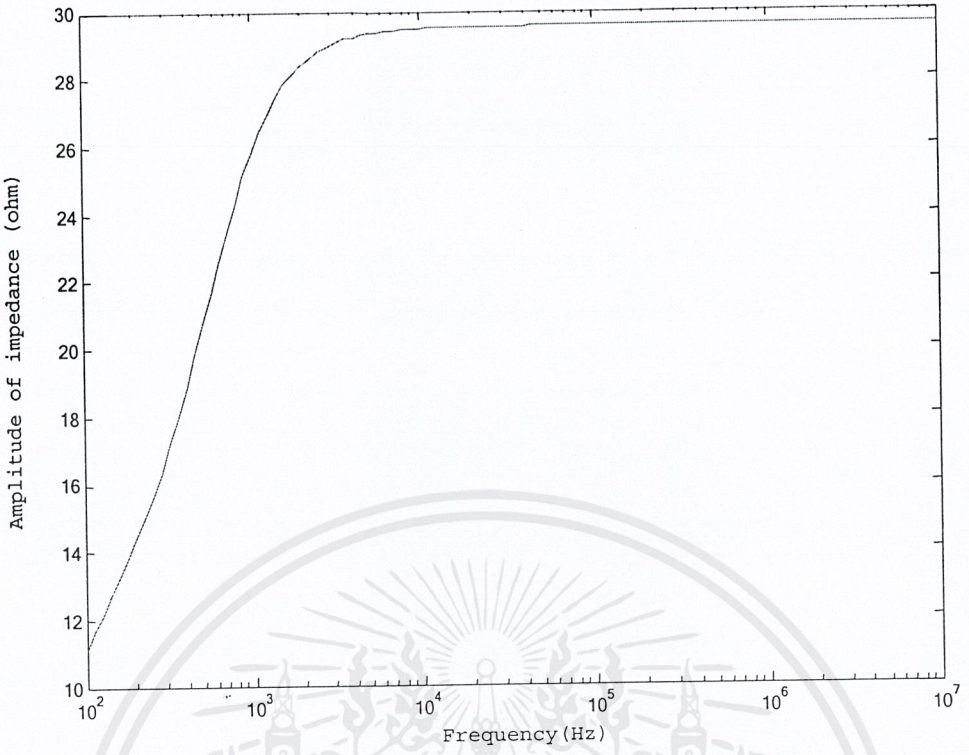
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



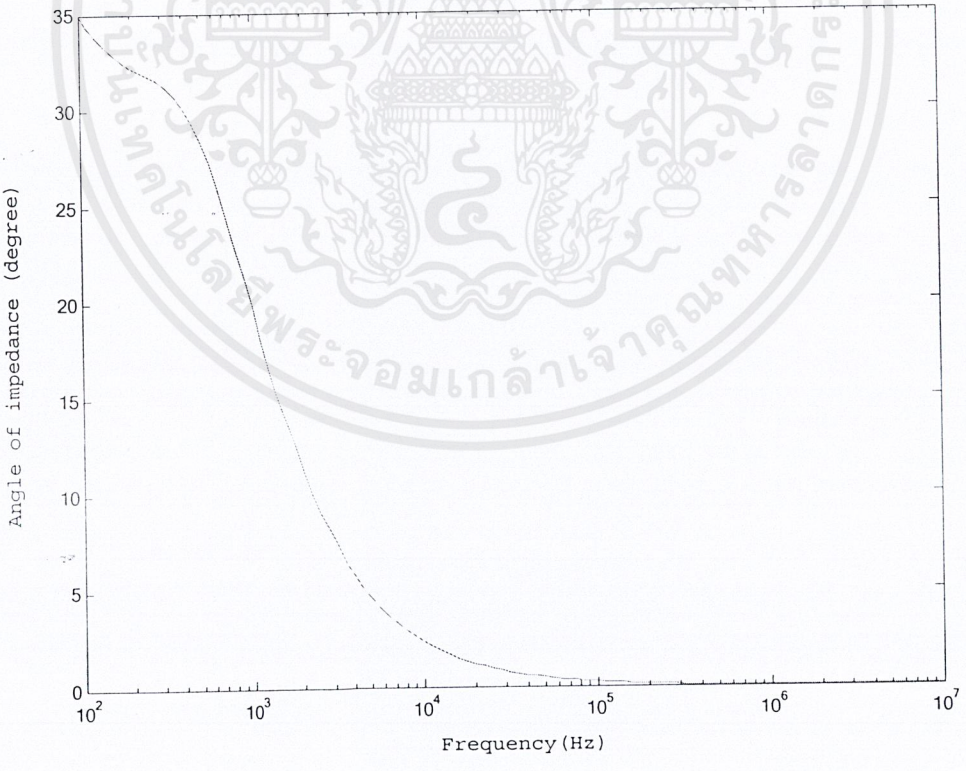

รูปที่3.7 วงจรสมมูล Shunt Admittance ที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ผลที่ได้จาก Frequency Dependence Resistance




รูปที่3.8 ค่า Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่




รูปที่3.9 ค่ามุมเฟสของ Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตรที่ใช้คำนวณหา Frequency Dependent Resistance</u>

กำหนด $\rho_{cu} = 1.672*10^{-8}$ ,$\mu_{cu} = 1$ และจากการวัด Winding $r_1 = 0.04025$ mm

จาก V-I method $R_{dc} = 4.688\ \Omega$

$$FROM \quad R_i = \frac{\rho l}{\pi(r_i^2 - r_{i+1}^2)}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{\rho l}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}}{\frac{\rho l}{\pi(r_2^2 - r_3^2)}} = \frac{(r_2^2 - r_3^2)}{(r_1^2 - r_2^2)} = \frac{A_2}{A_1} = 2$$

$$\frac{R_2}{R_3} = 2 = \frac{(r_3^2 - r_4^2)}{(r_2^2 - r_3^2)} = \frac{A_3}{A_2}$$

$$\frac{R_3}{R_4} = 2 = \frac{r_4^2}{(r_3^2 - r_4^2)} = \frac{A_4}{A_3}$$

ให้ A 1 = a

$A_2 = 2a$

$A_3 = 4a$

$A_4 = 8a = \pi r_4^2$

$Total\ area\ of\ winding = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 15a$

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A_{total}} = \frac{\rho l}{15a} = \frac{\rho l}{\pi r_1^2}$$

$$R_4 = \frac{\rho l}{8a} = \frac{\rho l}{\pi r_4^2}$$

$$\frac{R_{dc}}{R_5} = \frac{8a}{15a} = \frac{\pi r_4^2}{\pi r_1^2} = (\frac{r_4}{r_1})^2$$

$$R_i = \frac{\rho l}{A_i}(i = 1,2,3,4,5) \qquad ;\rho = 1.672*10^{-8}$$

จากทฤษฎี [10] ต้องคูณ $R_i$ ด้วย 0.9

ได้ R 4 = 7.9110 $\Omega$

R 3 = 15.8220 $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R 2 = 31.6440 Ω

R 1 = 63.2880 Ω

$$\frac{r_1}{r_4} = \sqrt{\frac{8}{15}} \qquad ,r_4 = \sqrt{\frac{8}{15}} * r_1 \quad : find\ r_4$$

$$\frac{A_4}{A_3} = \frac{\pi r_4^2}{\pi(r_3^2 - r_4^2)} = 2 \quad ,r_4^2 = 2r_3^2 - 2r_4^2 \qquad ,r_3 = \sqrt{\frac{3r_4^2}{2}} \quad : find\ r_3$$

$$\frac{A_3}{A_2} = \frac{\pi(r_3^2 - r_4^2)}{\pi(r_2^2 - r_3^2)} = 2 \quad ,(r_3^2 - r_4^2) = 2r_2^2 - 2r_3^2 \quad ,r_2 = \sqrt{\frac{3r_3^2 - r_4^2}{2}} : find\ r_2$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi(r_2^2 - r_3^2)}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} = 2 \quad ,(r_2^2 - r_3^2) = 2r_1^2 - 2r_2^2 \quad ,r_1 = \sqrt{\frac{3r_2^2 - r_3^2}{2}} : find\ r_1$$

ได้ $r_1 = 0.04025$ mm จากการวัด

$r_2 = 0.03889$ mm

$r_3 = 0.0360.$ mm

$r_4 = 0.2939$ mm

$$FROM \quad L_i = \frac{\mu(r_{i-1} - r_i)}{2\pi r_i}$$

$$L_2 = \frac{\mu(r_1 - r_2)}{2\pi r_2}$$

$$L_3 = \frac{\mu(r_2 - r_3)}{2\pi r_3}$$

$$L_4 = \frac{\mu(r_3 - r_4)}{2\pi r_4}$$

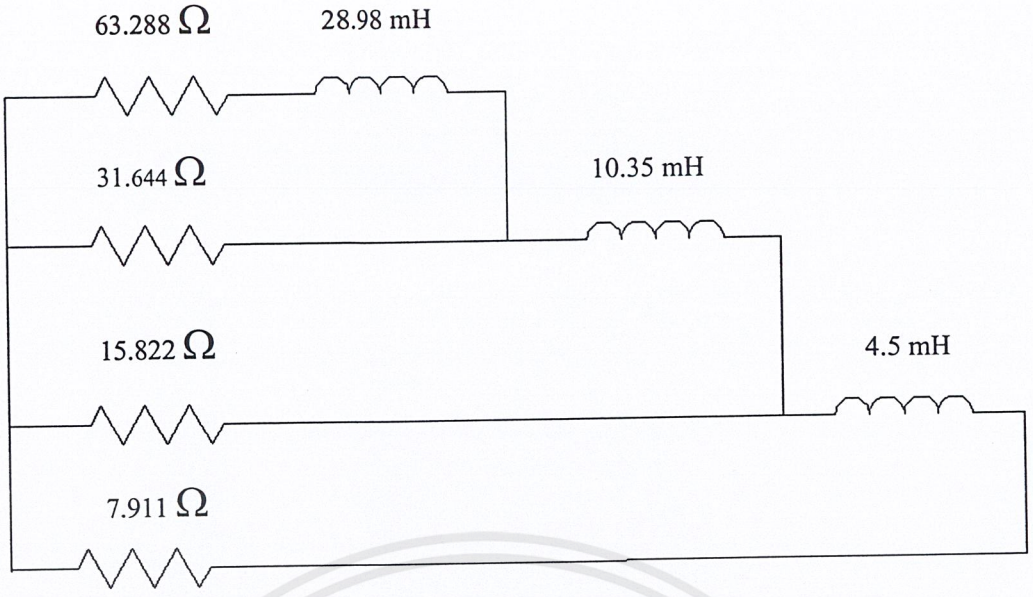
จากทฤษฎี [10] ต้องคูณ $L_i$ ด้วย 0.9

ได้ L 2 = 4.5 mH

L 3 = 10.35 mH

L 4 = 28.98 mH

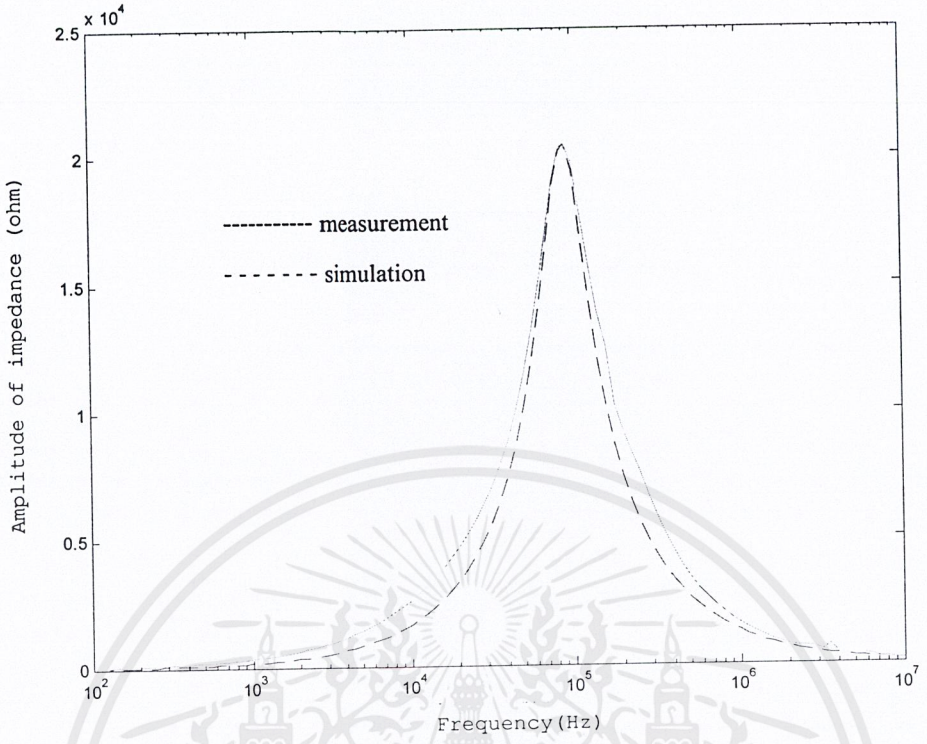
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



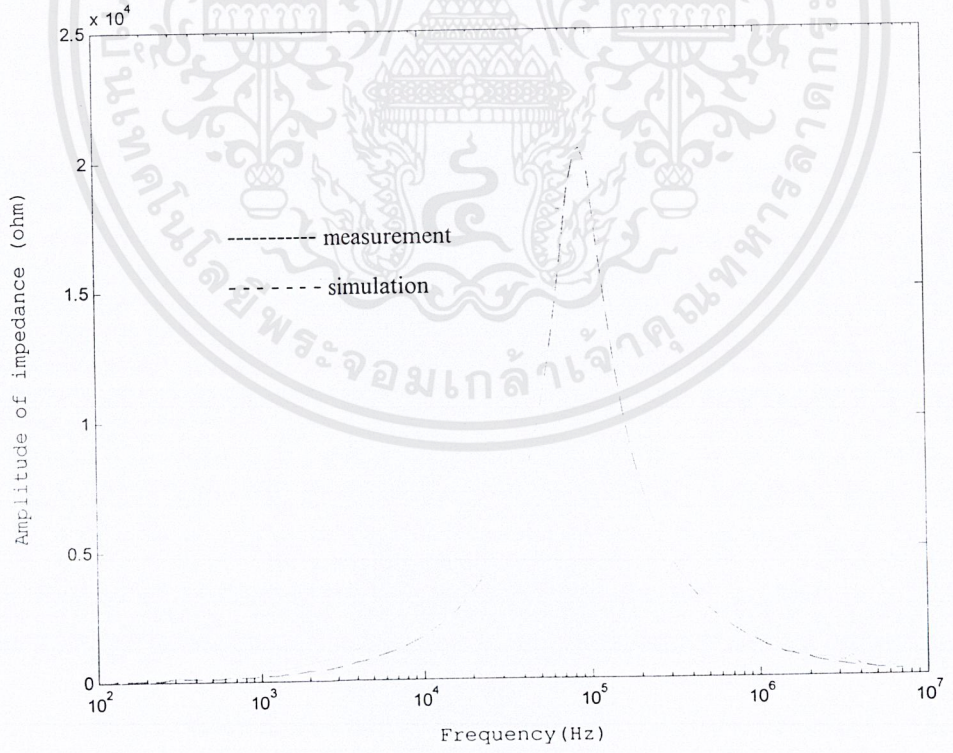

รูปที่3.10 วงจรสมมูล Frequency Dependence Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.5 เปรียบผลที่ได้จากวัดและการคำนวณโดยทฤษฎี

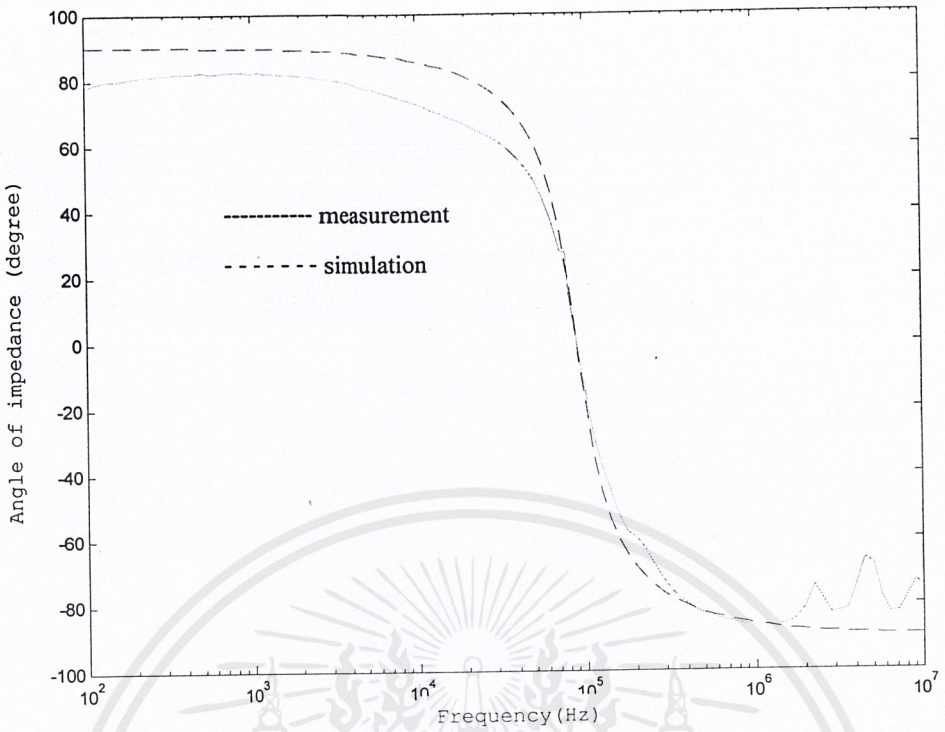



รูปที่3.11 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบกับค่าที่วัด

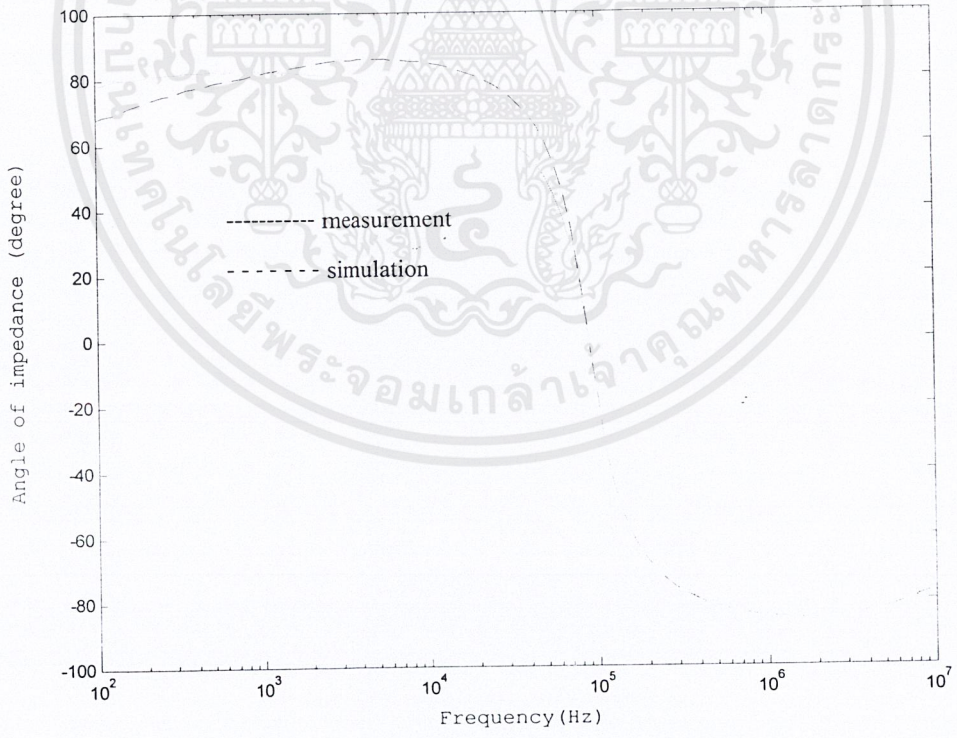



รูปที่3.12 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)
เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

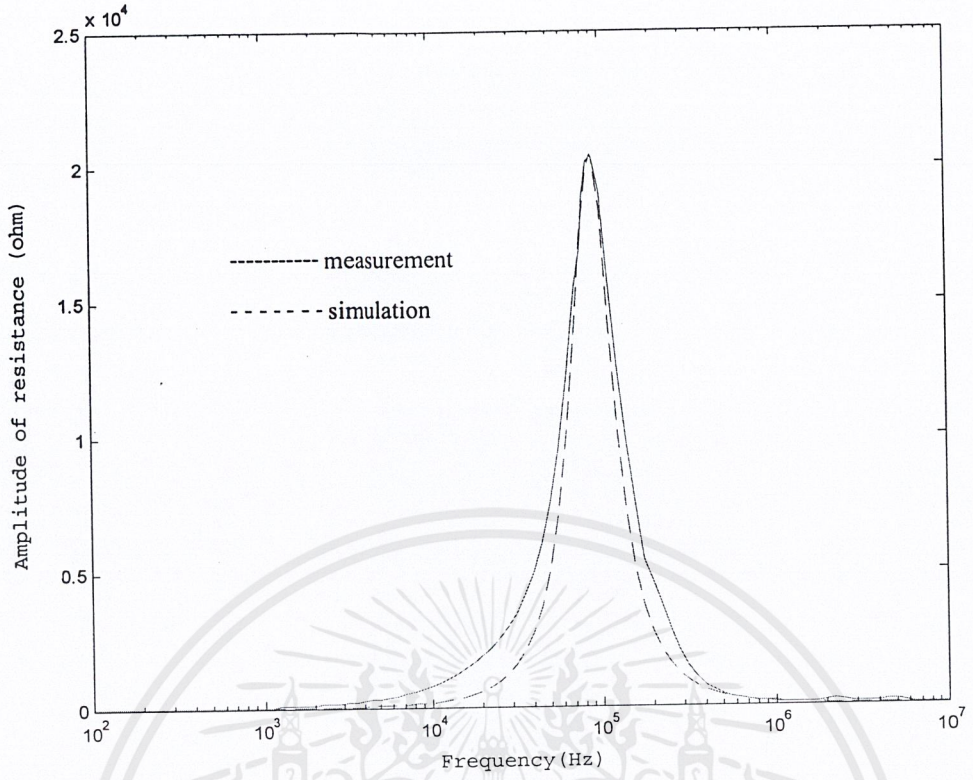



รูปที่3.13 มุมของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

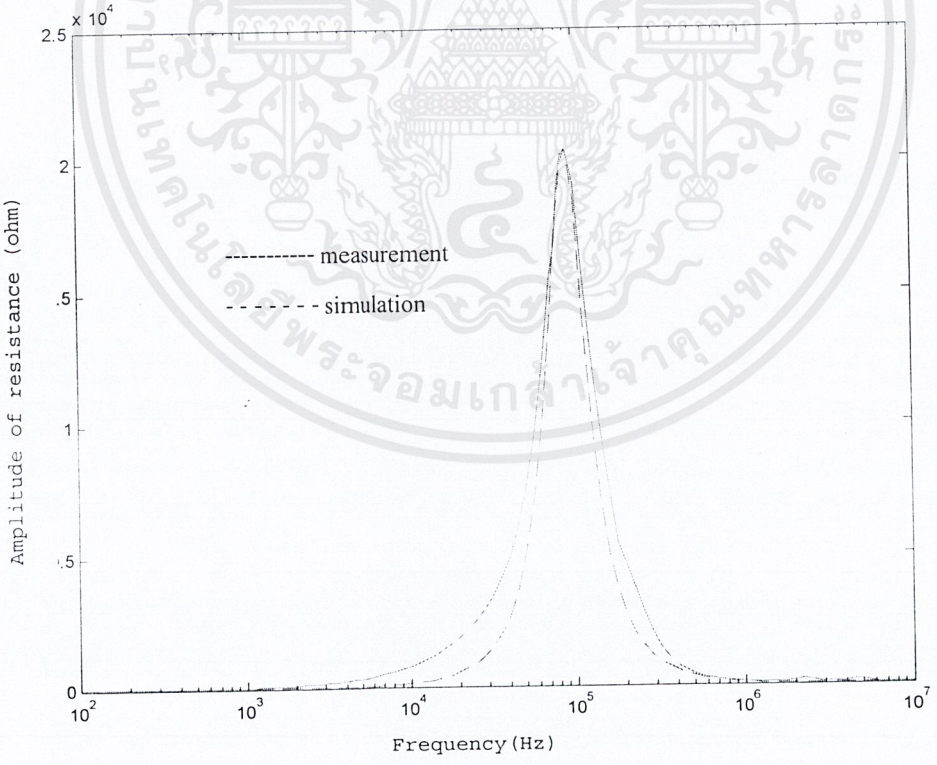



รูปที่3.14 ค่า มุม ของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

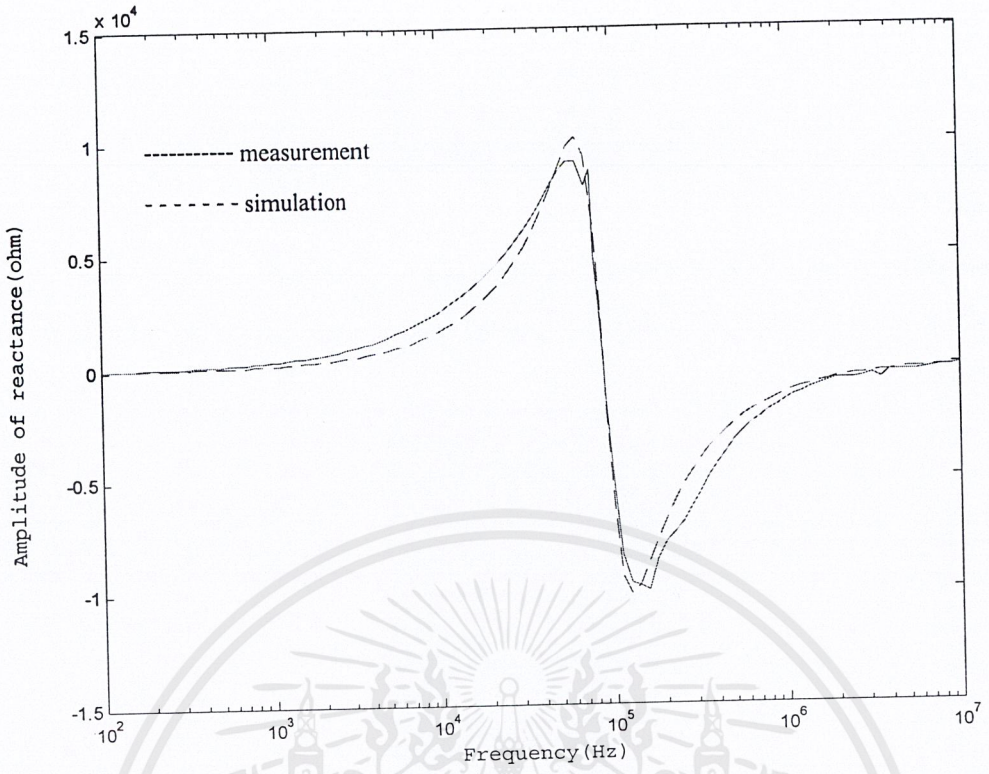



รูปที่3.15 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)

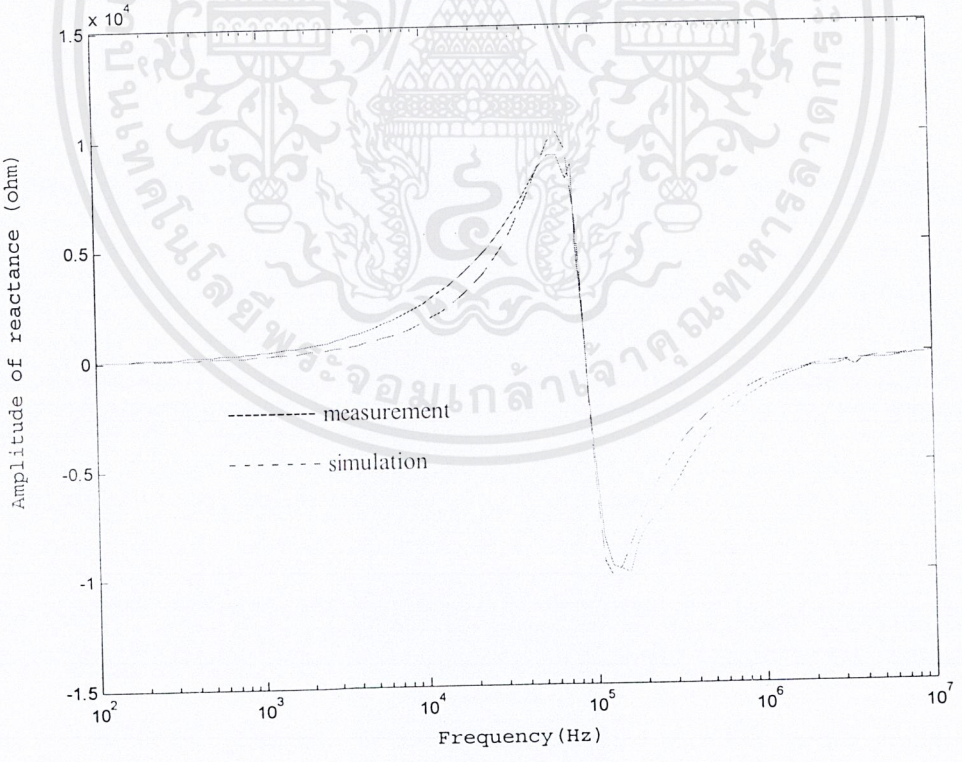



รูปที่3.16 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่3.17 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)




รูปที่3.18 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่4

## วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลองของ Motor 1 แรงม้า

### 4.1 การทดลองเพื่อหาวงจรสมมูลโดยวิธี No Load Test, Block Rotor Test, V-I Method

4.1.1 ผลการทดลอง 1 แรงม้า(Hp) โดย V-I method

| ค่า | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| V | 6.7 | 13.5 | 19.5 | 26.5 | 32.5 |
| I | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2 | 2.5 |
| R | 13.4 | 13.5 | 13 | 13.25 | 13 |

ตารางที่4.1 ผลการทดลองโดย V-I method

$R1 = (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)/ 5$

$R1 = (13.4+13.5+13+13.25+13)/5$

$= 13.22\ \Omega$

$Zb = Vb /( Ib< \varphi b ) = 85/ (3.1 <-39.6^{\circ}) = 27.419 <39.6^{\circ}$

$Rb = 27.419 \text{ Cos } 39.6^{\circ} = 21.13\ \Omega$

$Xb = 27.419 \text{ Sin } 39.6^{\circ} = 17.48\ \Omega$

$R2 = Rb - R1$

$R2 = 21.13-13.22 = 7.91\ \Omega$

$J (X1+X2) = Xb$

จากตาราง2.2 Empirical Distribution of leakage reactance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ class A

$X1 = X2 = 0.5Xb = 17.48/2 = 8.74\ \Omega$

4.1.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST

CH1 Volt/div = 10 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

CH2 Volt/div = 0.1 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 1

| Vo | Io | $\phi o$ |
|---|---|---|
| 220 V | 2.08 A | $79.2^{\circ}$ |

ตารางที่4.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rc=Vo/(Io.*.Cos $\phi$o)

Xm= Vo/(Io.*.Sin $\phi$o)

Rc=220/(2.08*Cos79.2) =564.46 $\Omega$

Xm=220/(2.08 Sin79.2) = 107.67 $\Omega$

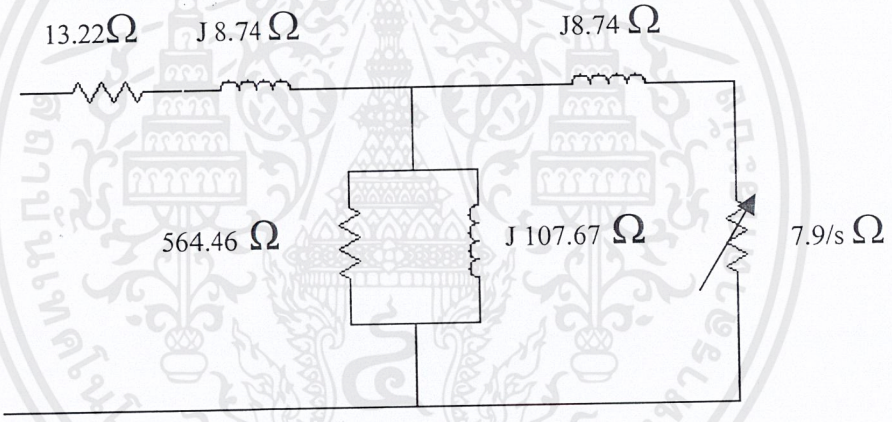
### 4.1.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST

CH1 Volt/div = 10 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

CH2 Volt/div = 0.1 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10$\Omega$

| Vb | Ib | $\phi$b |
|---|---|---|
| 85 V | 3.1 A | 39.6° |

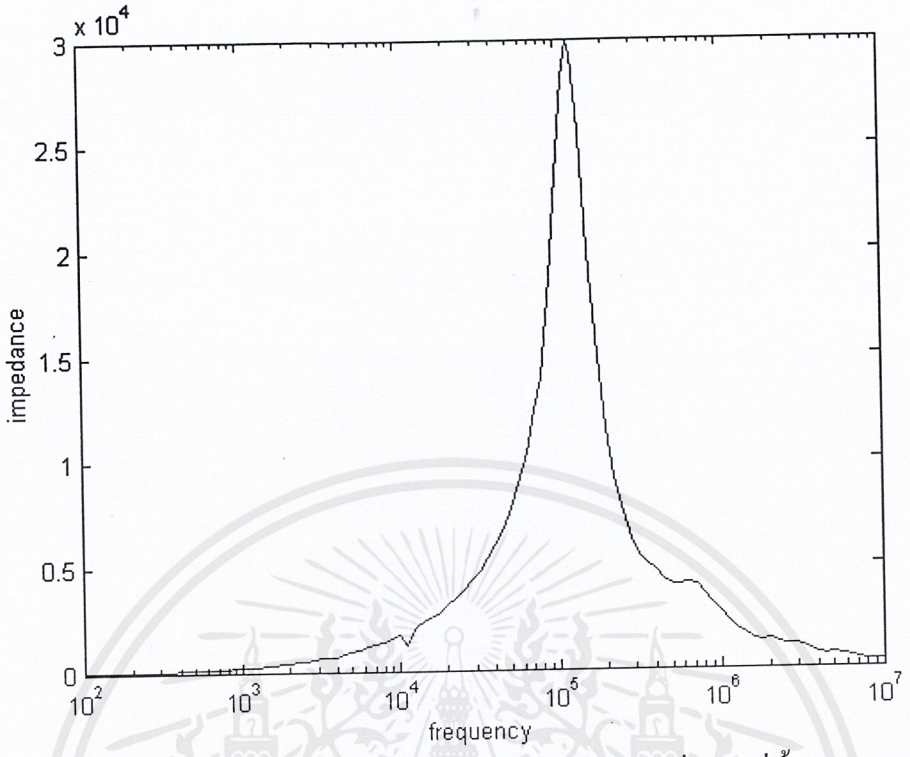
ตารางที่4.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST



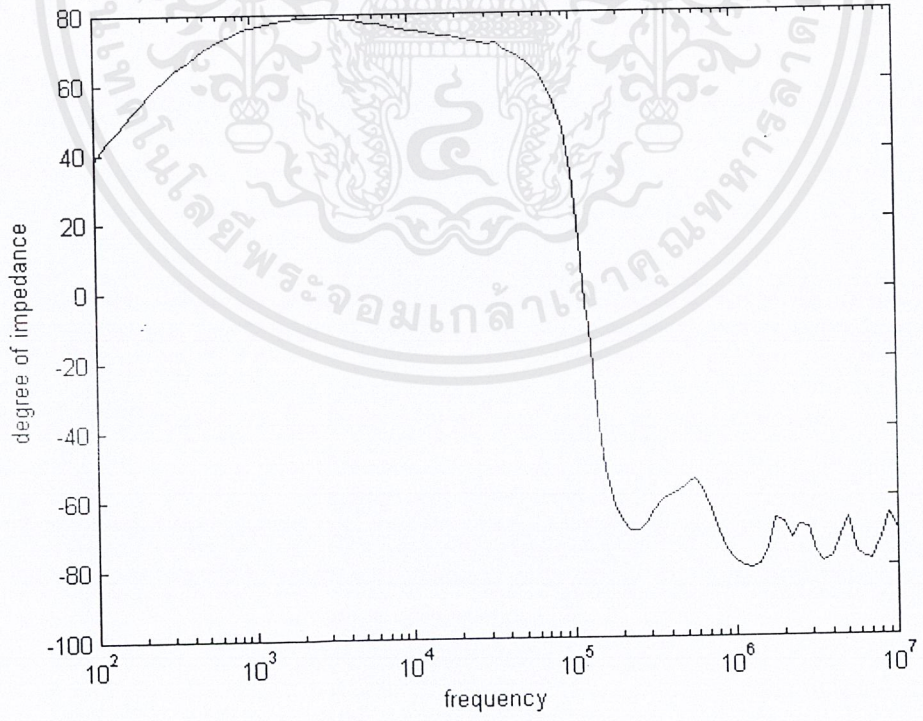

รูปที่4.1 รูปวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองเพื่อหาวงจรสังเคราะห์(Synthetic Circuit)




รูปที่4.2 ผลการวัด series impedance ของในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่

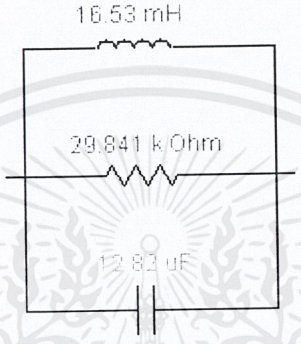



รูปที่4.3 ผลการวัดมุมเฟส $\theta(Z)$ ของ serics impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของ L-C ขนานของ Foster's circuits[9] ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ equivalent circuit ที่มีการตอบสนองความถี่เช่นเดียวกัน ให้กับขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังกล่าว โดยครอบคลุมย่านความถี่ 100 Hz ถึง 10MHz จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2และ4.3 เกิด resonance 1 จุด ที่ความถี่ 119.4 kHz ดังนั้นจึงสร้าง L-C circuit เพียง 1 วงจร

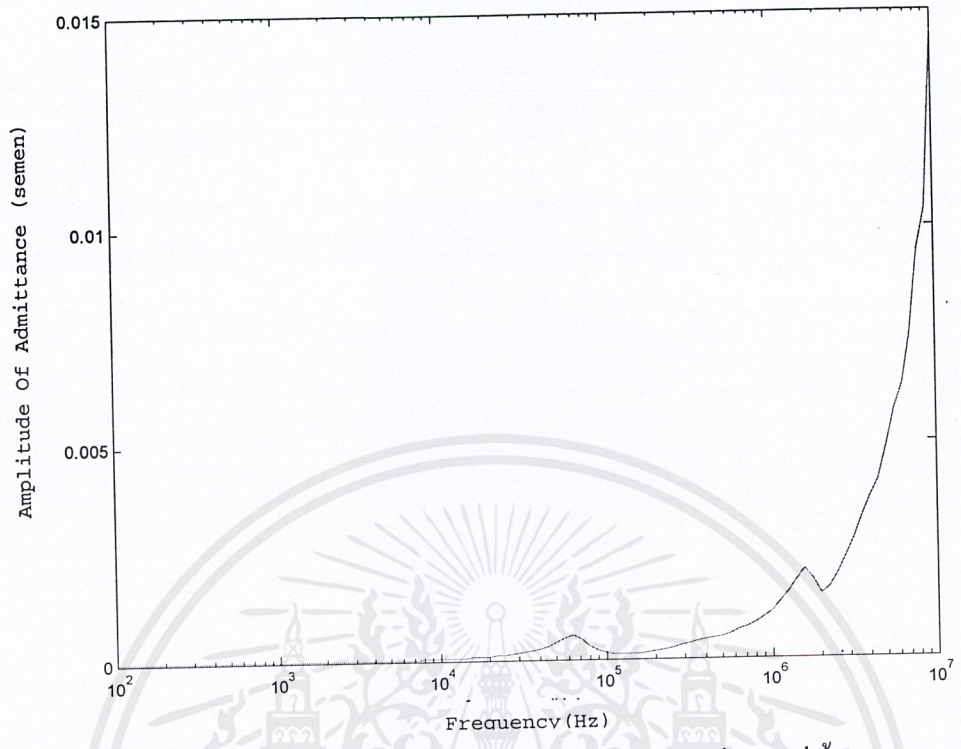
ค่าความต้านทานที่ถูกต่อขนานในวงจรสังเคราะห์ L-C ได้มาจากค่าค่าความต้านทานได้จากส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรสังเคราะห์ได้แสดง ดังรูป



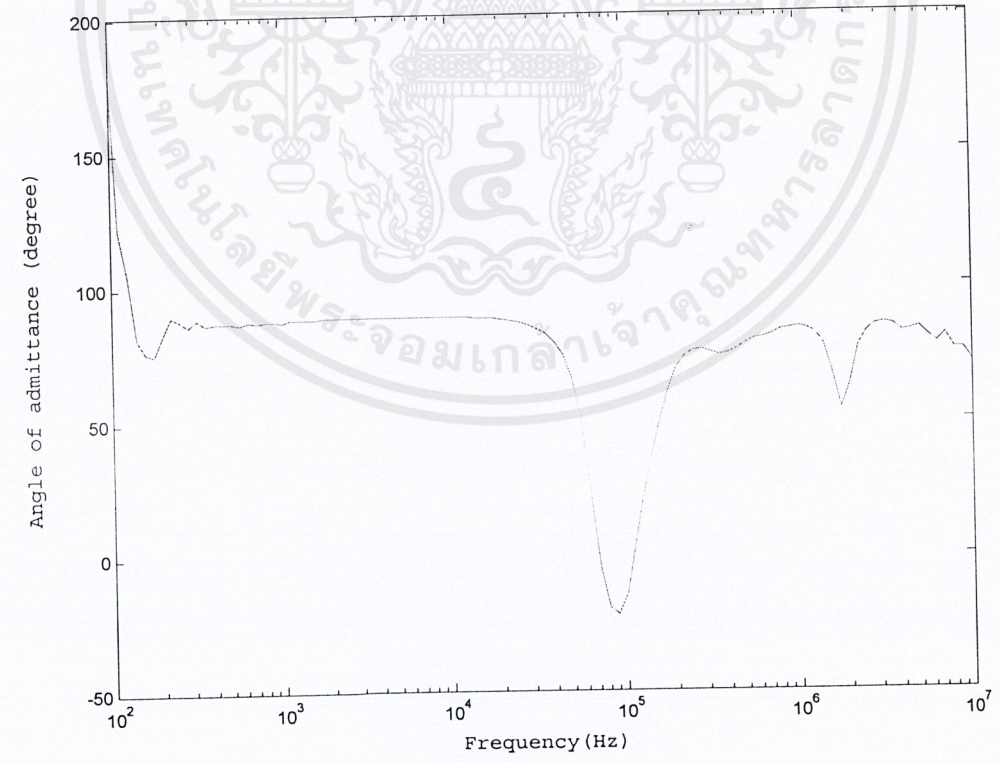

รูปที่4.4 วงจรสมมูล Synthetic Circuit ที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 ผลที่ได้จากการวัดค่า admittance และ phase angle โดยเครื่อง impedance analyzer

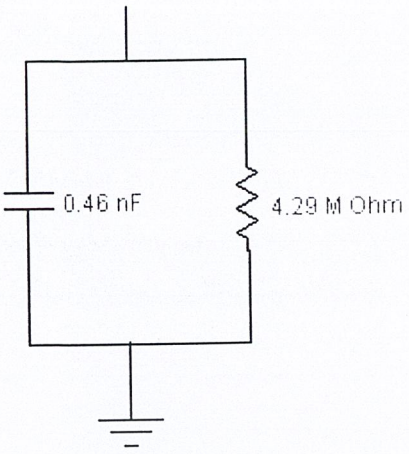



รูปที่4.5 ผลการวัดค่า shunt admittance ของขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับกับความถี่




รูปที่4.6 ผลการวัดค่ามุมเฟสของ admittance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่

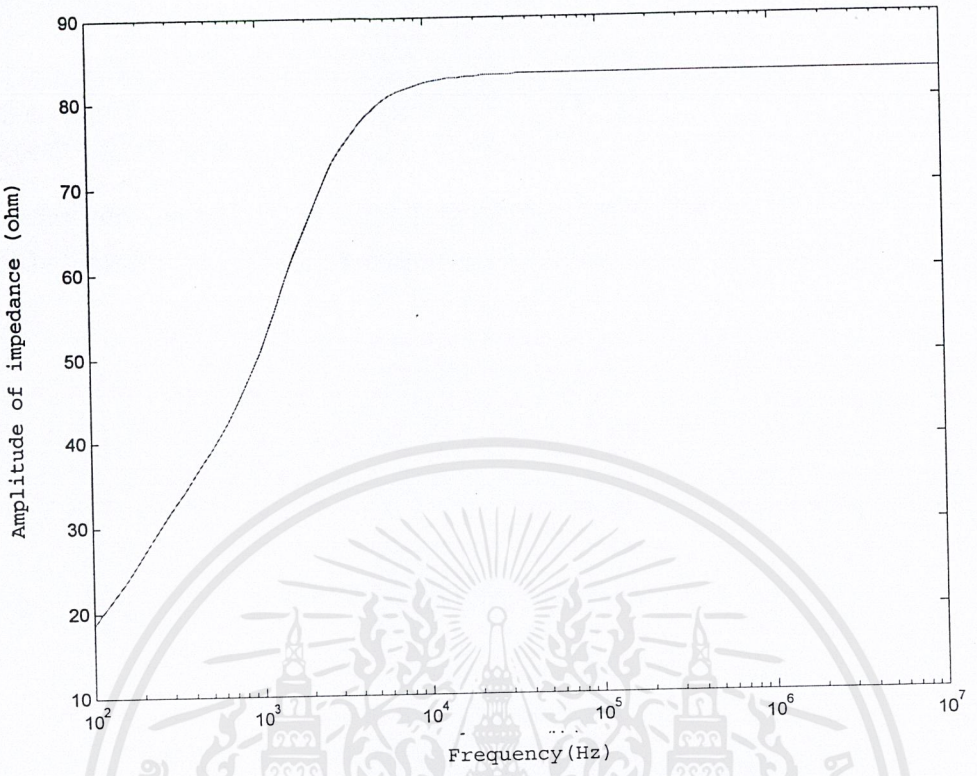
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



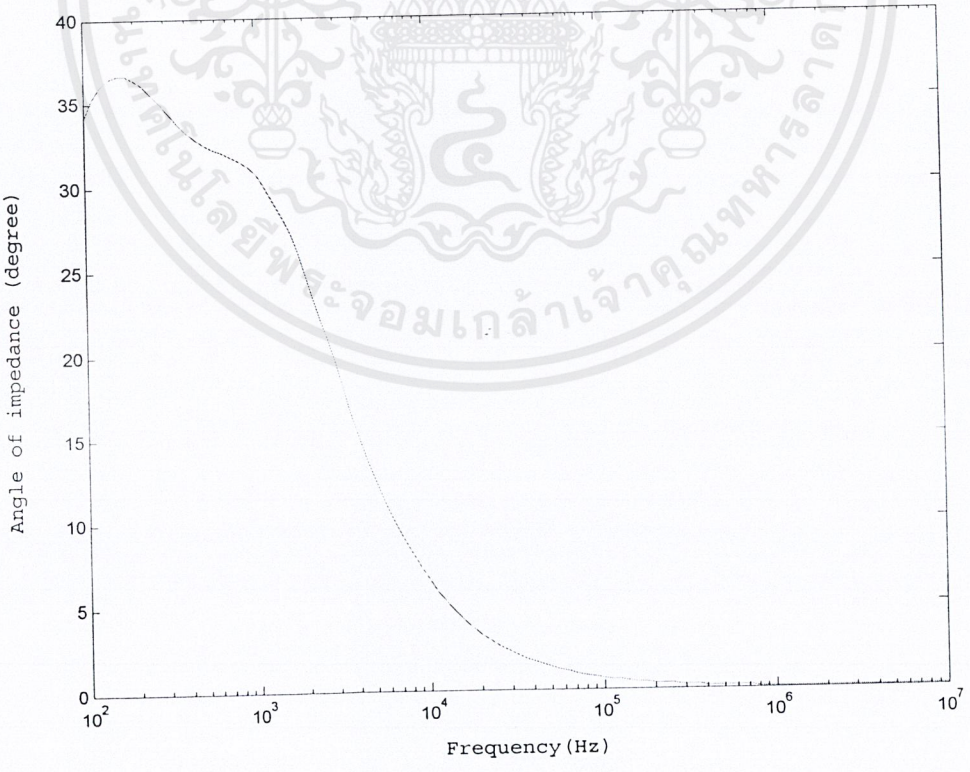

รูปที่4.7 วงจรสมมูล Shunt Admittance ที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ผลที่ได้จาก Frequency Dependence Resistance




รูปที่4.8 ค่า Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่




รูปที่4.9 ค่ามุมเฟสของ Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตรที่ใช้คำนวณหา Frequency Dependent Resistance</u>

กำหนด $\rho_{cu} = 1.672*10^{-8}$ ,$\mu_{cu} = 1$ และจากการวัด Winding $r_1$ =0.03 mm

จาก V-I method $R_{dc}$= 13.22 $\Omega$

$$FROM \quad R_i = \frac{\rho l}{\pi(r_i^2 - r_{i+1}^2)}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{\rho l}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}}{\frac{\rho l}{\pi(r_2^2 - r_3^2)}} = \frac{(r_2^2 - r_3^2)}{(r_1^2 - r_2^2)} = \frac{A_2}{A_1} = 2$$

$$\frac{R_2}{R_3} = 2 = \frac{r_3^2}{(r_2^2 - r_3^2)} = \frac{A_3}{A_2}$$

ให้ A 1 = a

$A_2 = 2a$

$A_3 = 4a = \pi r_3^2$

$$Total\ area\ of\ winding = A_1 + A_2 + A_3 = 7a$$

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A_{total}} = \frac{\rho l}{7a} = \frac{\rho l}{\pi r_1^2}$$

$$R_3 = \frac{\rho l}{4a} = \frac{\rho l}{\pi r_3^2}$$

$$\frac{R_{dc}}{R_3} = \frac{4a}{7a} = \frac{\pi r_3^2}{\pi r_1^2} = (\frac{r_3}{r_1})^2$$

$$R_i = \frac{\rho l}{A_i}(i = 1,2,3,4,5); \rho = 1.672*10^{-8}$$

จากทฤษฎี [10] ต้องคูณ $R_i$ ด้วย 0.9

ได้ R 3 = 20.8215 $\Omega$

R 2 = 41.643 $\Omega$

R 1 = 83.286 $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{r_1}{r_3} = \sqrt{\frac{4}{7}} \qquad ,r_3 = \sqrt{\frac{7}{4}} * r_1 \qquad : find\ r_3$$

$$\frac{A_3}{A_2} = \frac{\pi r_3^2}{\pi(r_2^2 - r_3^2)} = 2 \quad ,r_3^2 = 2r_2^2 - 2r_3^2 \qquad ,r_2 = \sqrt{\frac{3r_3^2}{2}} \qquad : find\ r_2$$

ได้ r 1 = 0.03 mm จากการวัด

r 2 = 0.02777 mm

r 3 = 0.02268 mm

$$FROM \quad L_i = \frac{\mu(r_{i-1} - r_i)}{2\pi r_i}$$

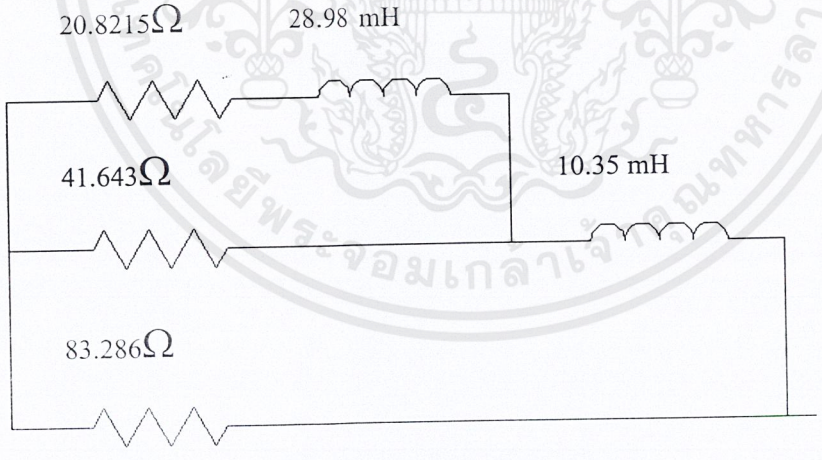
$$L_2 = \frac{\mu(r_1 - r_2)}{2\pi r_2}$$

$$L_3 = \frac{\mu(r_2 - r_3)}{2\pi r_3}$$

จากทฤษฎี [10] ต้องคูณ $L_i$ ด้วย 0.9

ได้ L 2 = 10.35 mH

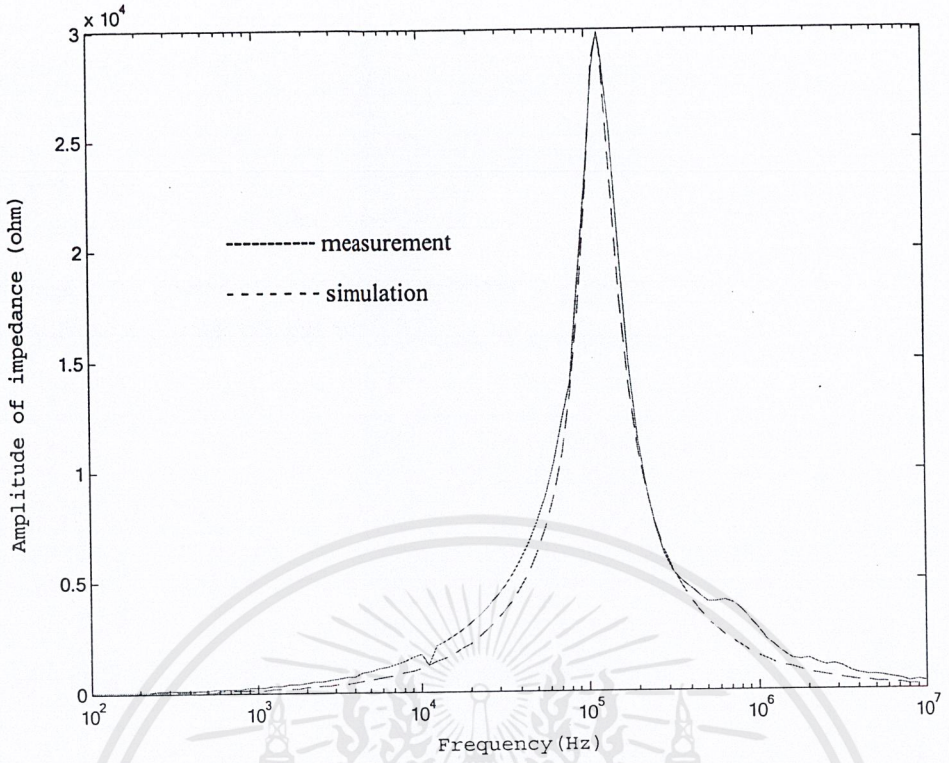
L 3 = 28.98 mH



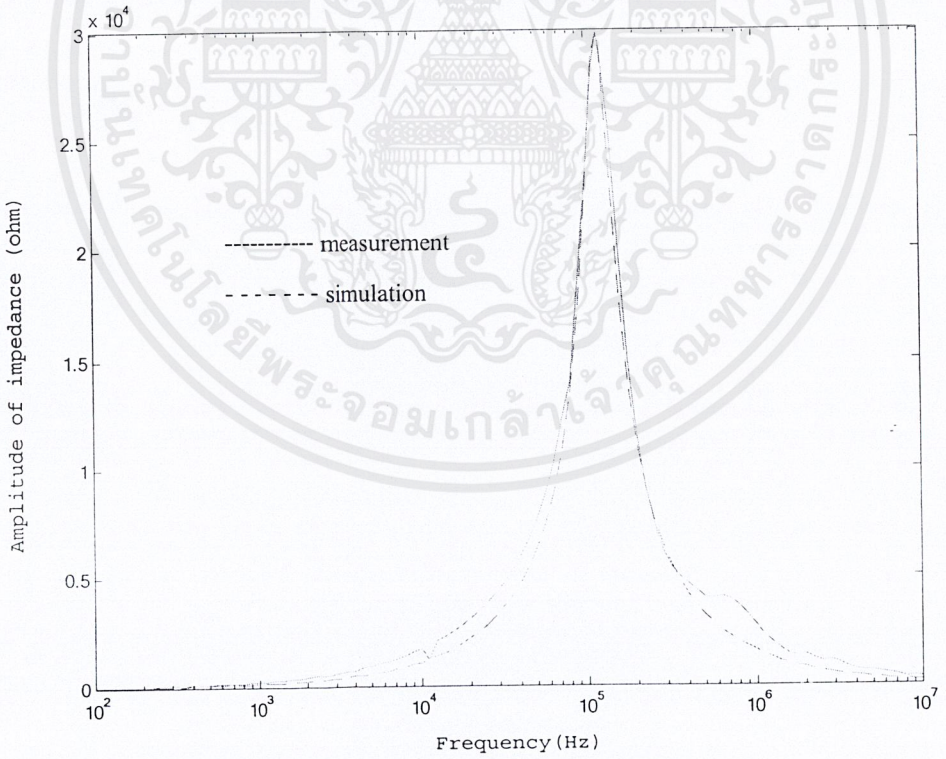

รูปที่4.10 วงจรสมมูล Frequency Dependence Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 เปรียบผลที่ได้จากวัดและการคำนวณโดยทฤษฎี

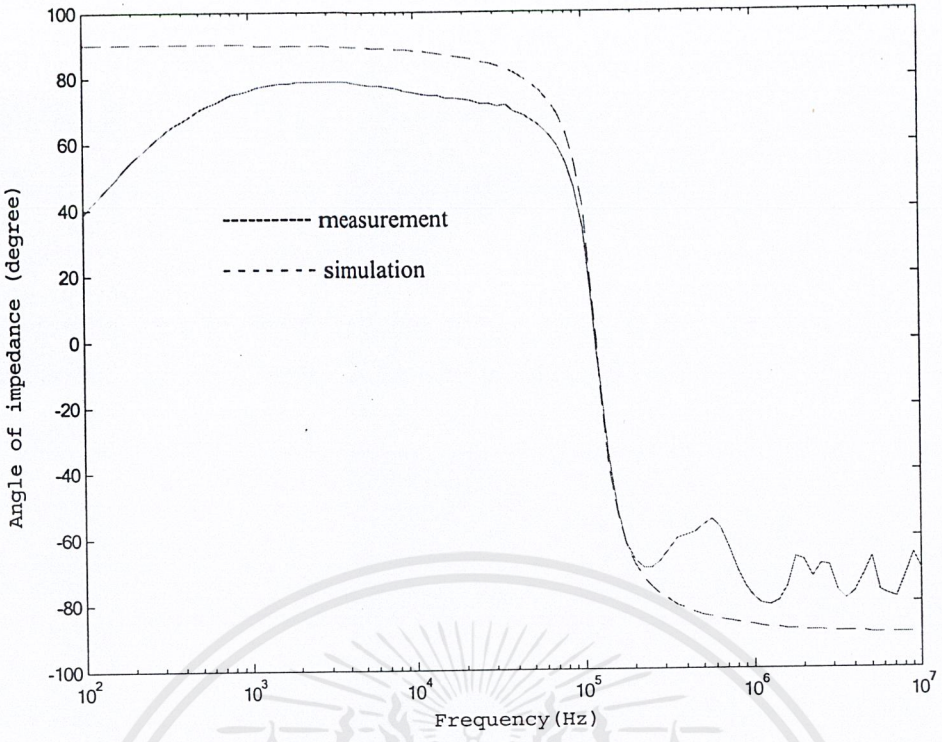



รูปที่4.11 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบกับค่าที่วัด

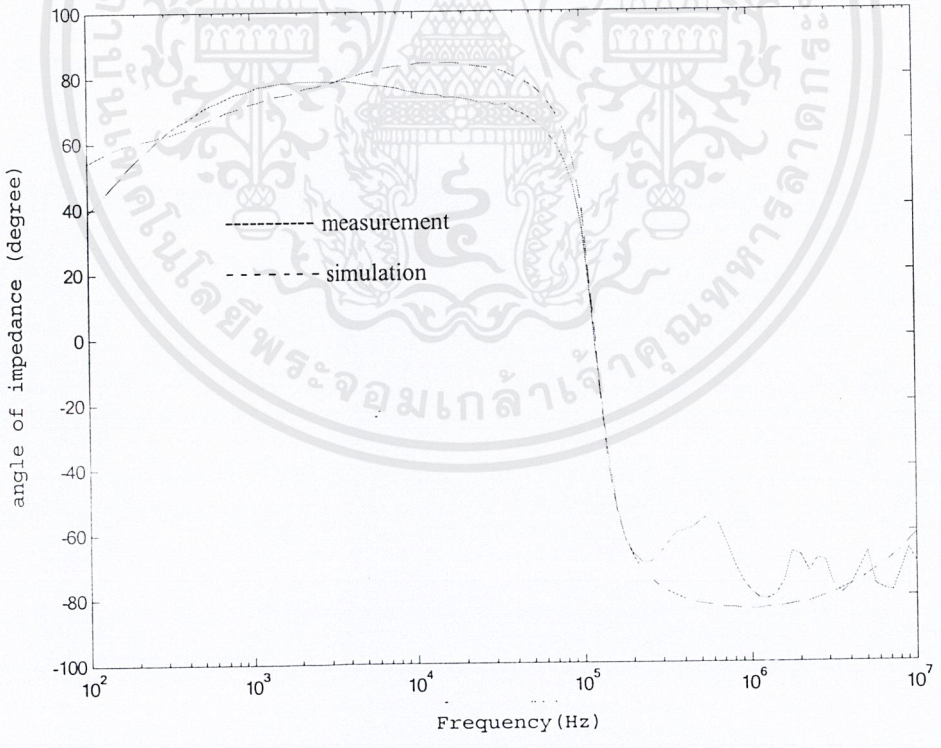



รูปที่4.12 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)
เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

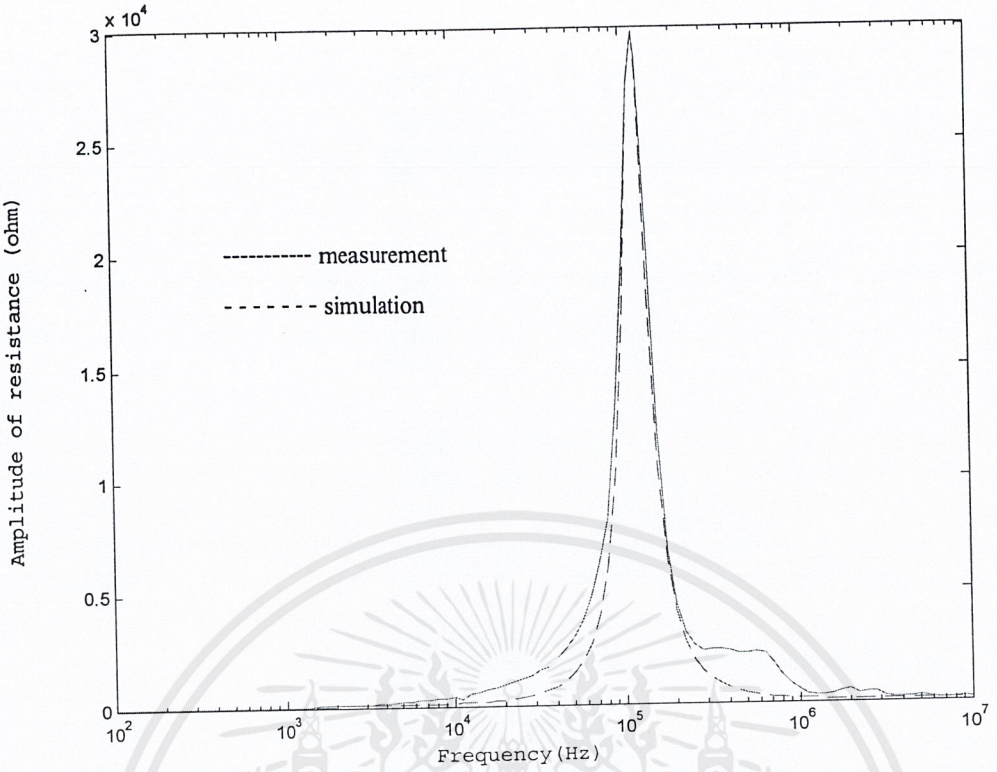



รูปที่4.13 กราฟของค่ามุมของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

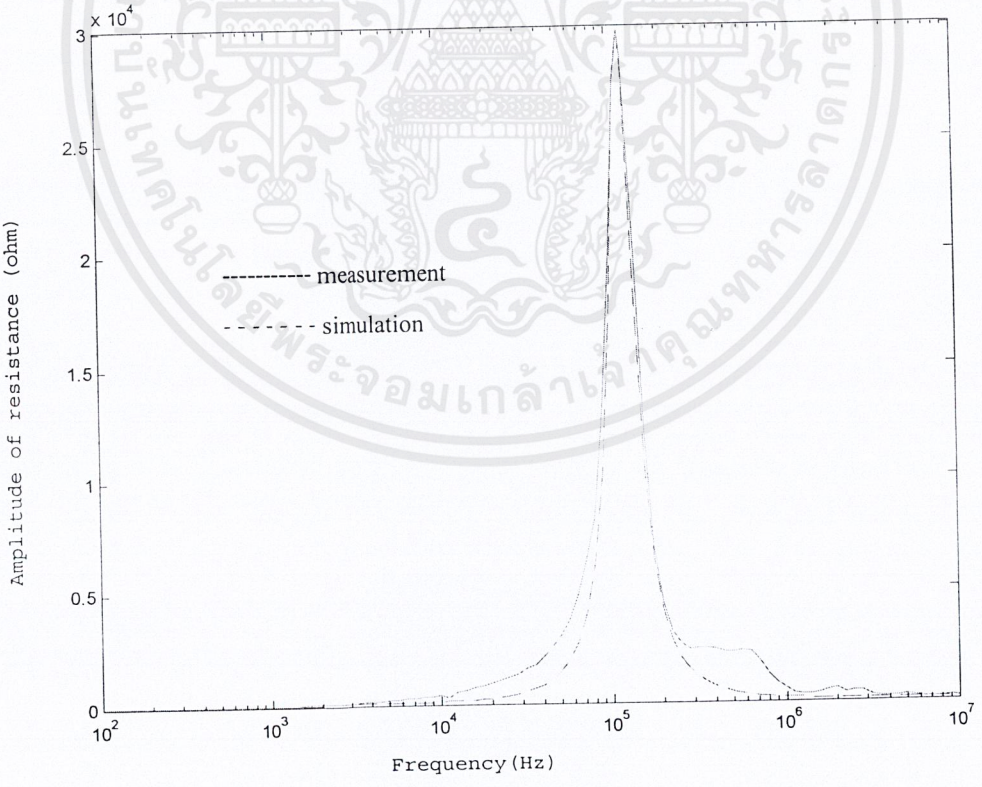



รูปที่4.14 ค่า มุม ของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

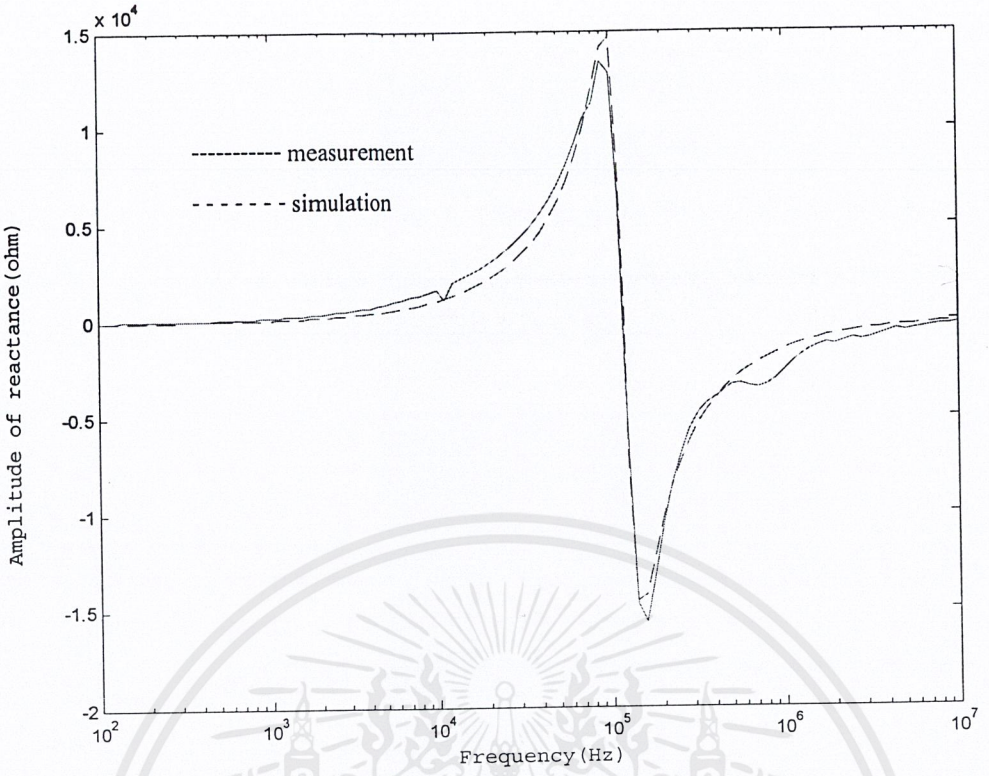



รูปที่4.15 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)

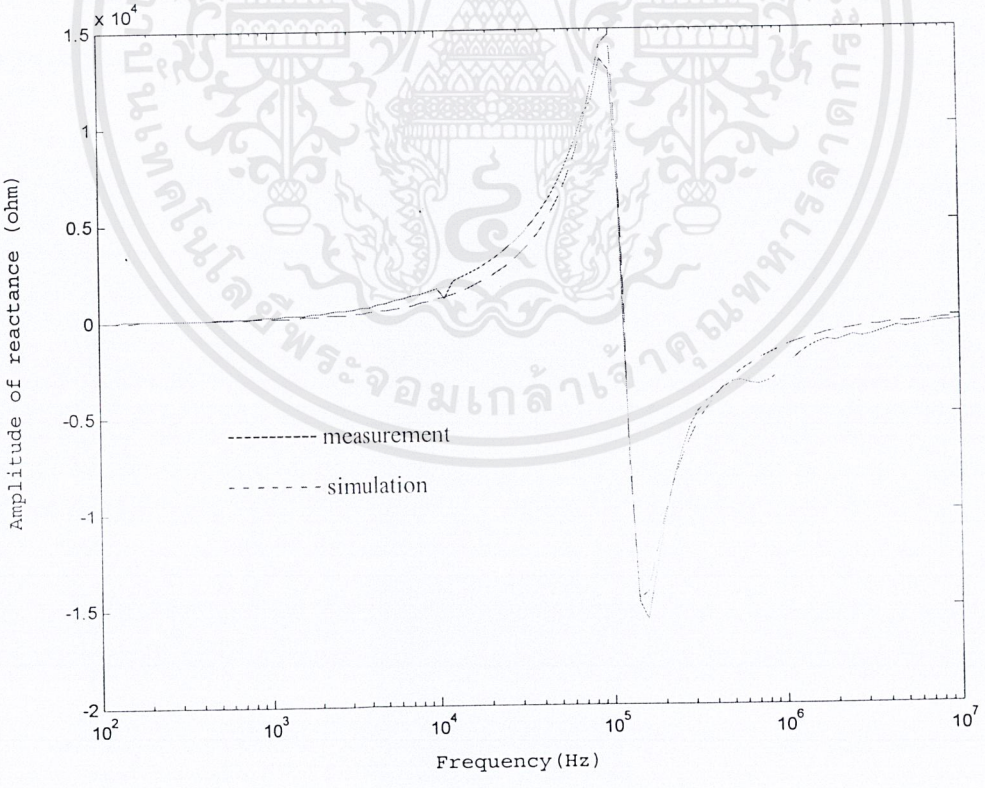



รูปที่4.16 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่4.17 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)




รูปที่4.18 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่5

## วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง Motor0.5แรงม้า

### 5.1 การทดลองเพื่อหาวงจรสมมูลโดยวิธี No Load Test, Block Rotor Test, V-I Method

5.1.1 ผลการทดลอง 0.5 แรงม้า(Hp) โดย V-I method

| ค่า | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| V | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| I | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
| R | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |

$R1 = (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)/ 5$

$R1 = (20+20+20+20+20)/5$

$= 20\ \Omega$

$Zb = Vb /( Ib < \varphi b ) = 56/1.15 < -46.8^{\circ} = 48.7 < 46.8^{\circ}$

$Rb = 48.7 \cos 46.8^{\circ} = 33.34\ \Omega$

$Xb = 48.7 \sin 46.8^{\circ} = 35.5\ \Omega$

$R2 = Rb - R1$

$R2 = 33.34-20 = 13.34\ \Omega$

$J (X1+X2) = Xb$

จากตาราง2.2 Empirical Distribution of leakage reactance ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ class A

$X1 = X2 = 0.5Xb = 35.5/2 = 17.75\ \Omega$

5.1.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST

CH1 Volt/div = 10 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

CH2 Volt/div = 0.1 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 1

| Vo | Io | $\phi o$ |
|---|---|---|
| 220 V | 0.75 A | $82.8^{\circ}$ |

ตารางที่5.2 ผลการทดลองโดยวิธี NO LOAD TEST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rc=Vo/(Io.*.Cos $\phi$o)

Xm= Vo/(Io.*.Sin $\phi$o)

Rc=220/ (0.75*Cos82.8) =2340.43 $\Omega$

Xm= 220/(0.75*Sin82.8) = 295.66 $\Omega$

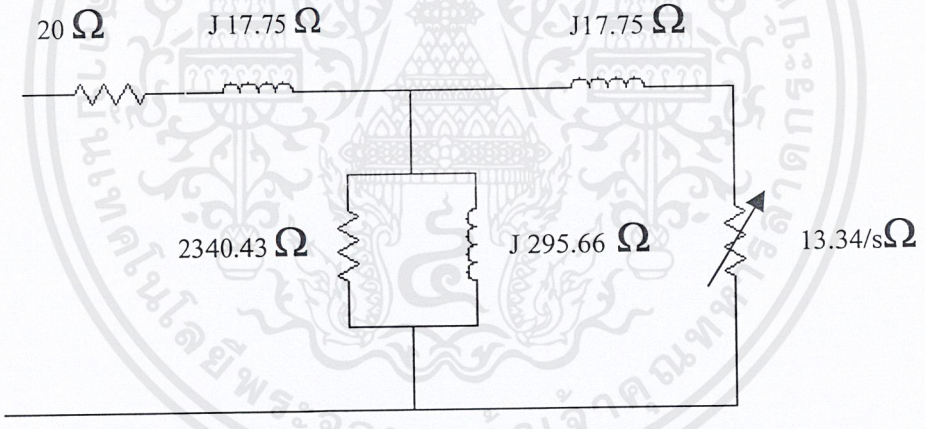
### 5.1.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST

CH1 Volt/div = 10 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

CH2 Volt/div = 0.1 V/Div, Time/DIV = 2 ms, Probe X 10

| Vb | Ib | $\phi$b |
|---|---|---|
| 70 V | 1.15 A | 46.8° |

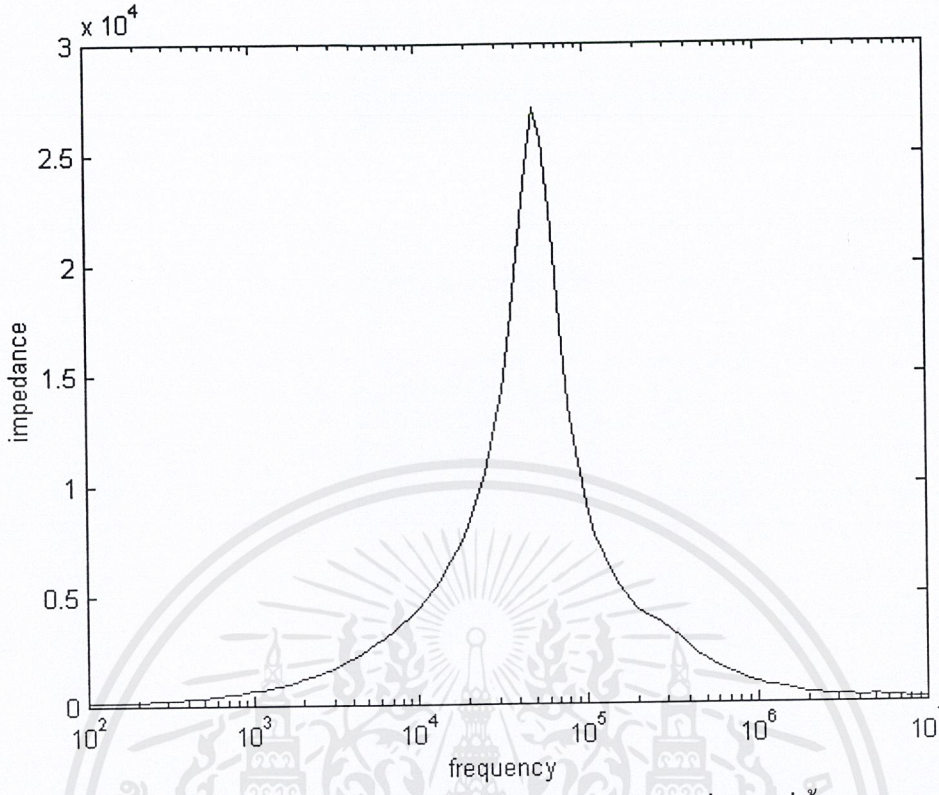
ตารางที่5.3 ผลการทดลองโดยวิธี BLOCK ROTOR TEST



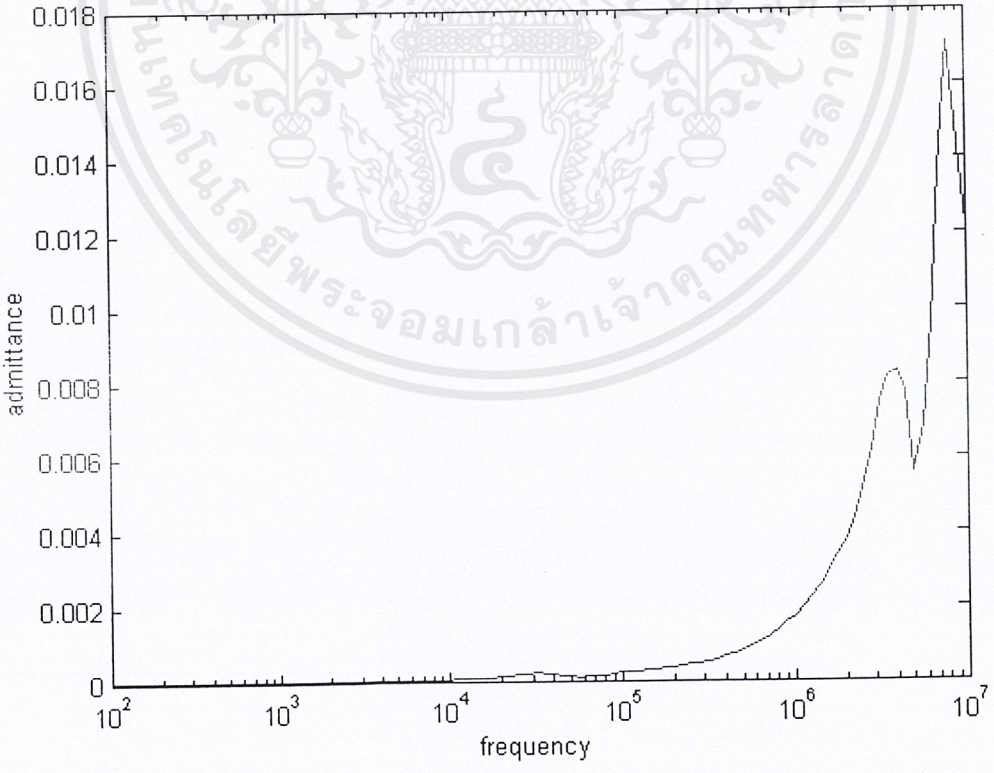

รูปที่ 5.1 รูปวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดลองเพื่อหาวงจรสังเคราะห์(Synthetic Circuit)




รูปที่ 5.2 ผลการวัด series impedance ของในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่

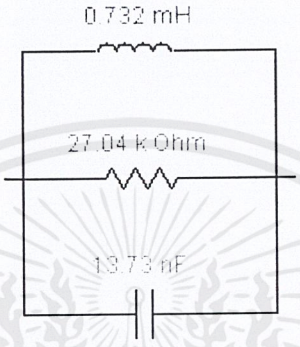



รูปที่ 5.3 ผลการวัดมุมเฟส $\theta(Z)$ ของ series impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของ L-C ขนานของ Fosters circuits[9] ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ equivalent circuit ที่มีการตอบสนองความถี่เช่นเดียวกัน ให้กับขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังกล่าว โดยครอบคลุมย่านความถี่ 100 Hz ถึง 10 MHz จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ3.3 เกิด resonance 1 จุด ที่ความถี่ 50.188 kHz ดังนั้นจึงสร้าง L-C circuit เพียง 1 วงจร

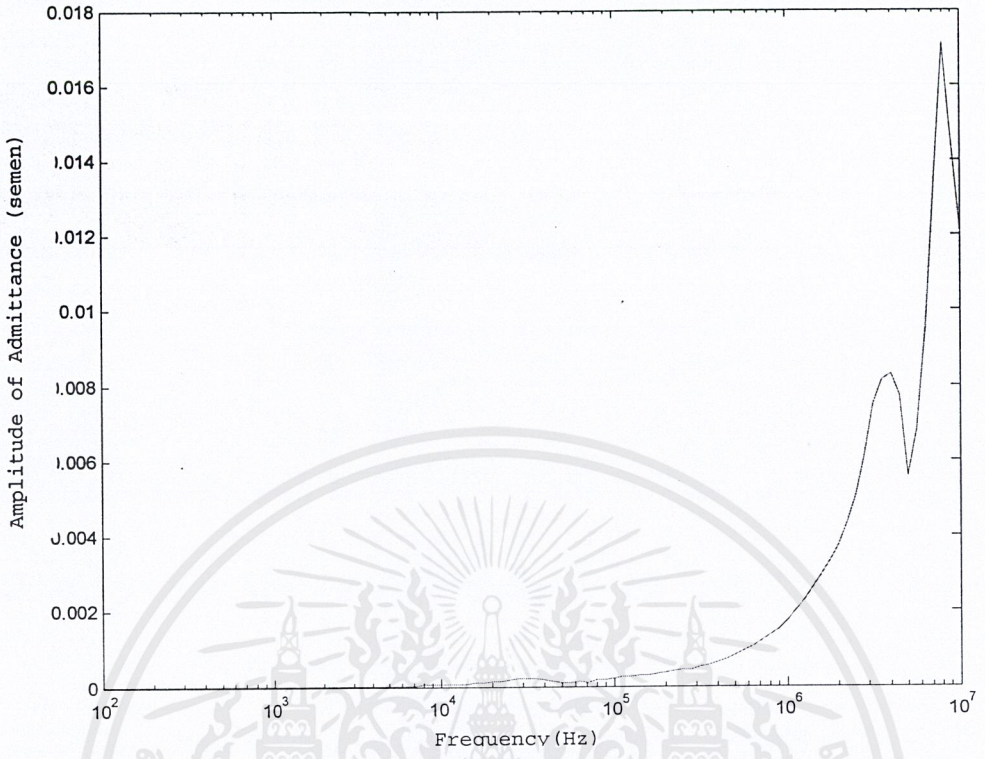
ค่าความต้านทานที่ถูกต่อขนานในวงจรสังเคราะห์ L-C ได้มาจากค่าค่าความต้านทานได้จากส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรสังเคราะห์ได้แสดง ดังรูป



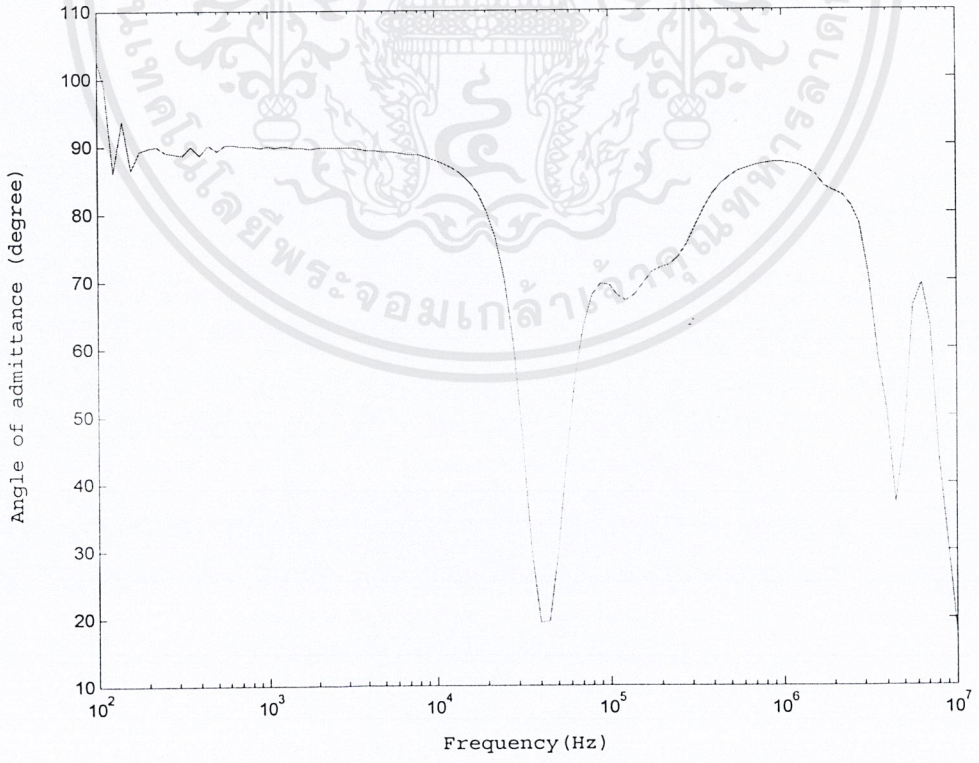

รูปที่ 5.4 วงจรสมมูล Synthetic Circuit ที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.3 ผลที่ได้จากการวัดค่า admittance และ phase angle โดยเครื่อง impedance analyzer

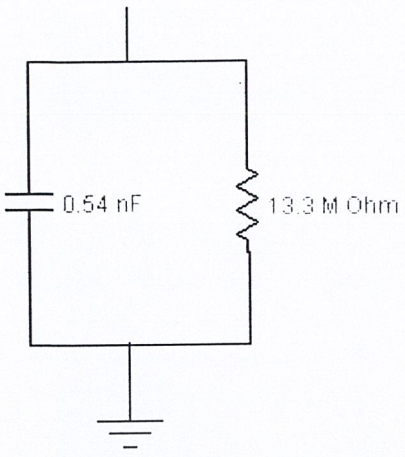



รูปที่ 5.5 ผลการวัดค่า shunt admittance ของขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับกับความถี่




**รูปที่ 5.6 ผลการวัดค่ามุมเฟสของ admittance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่**

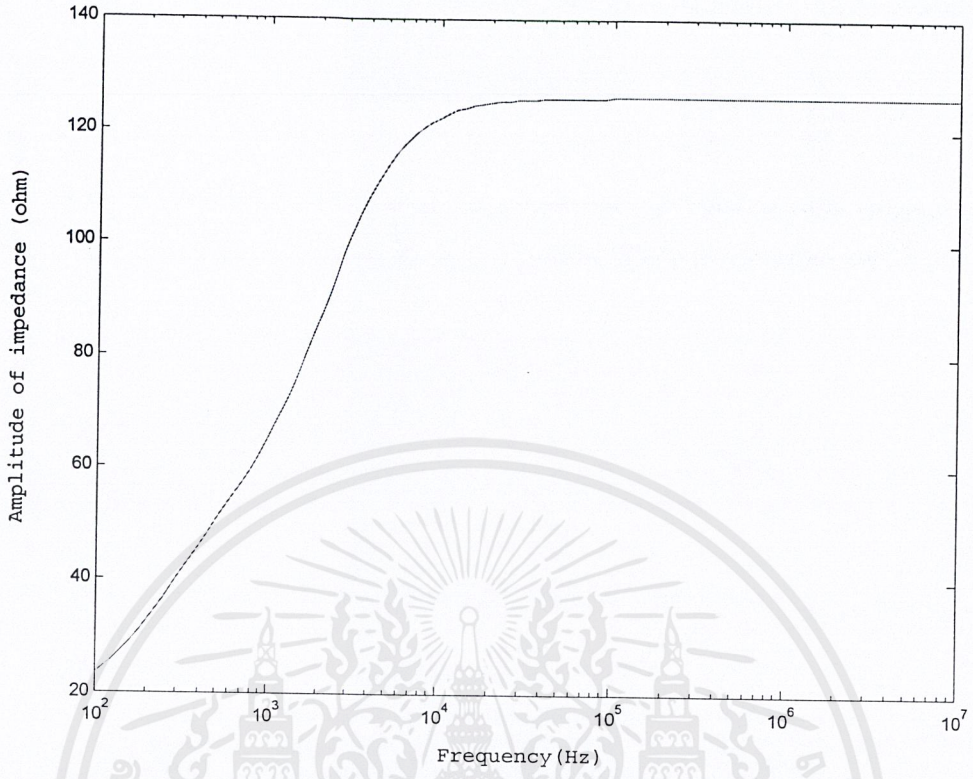
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



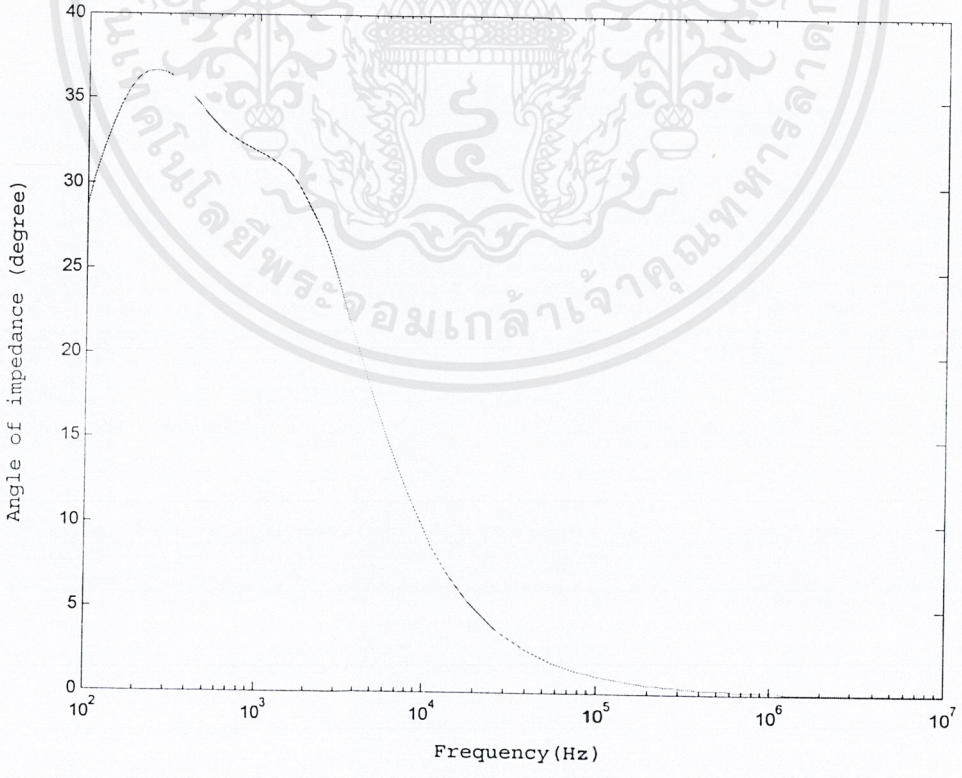

รูปที่ 5.7 วงจรสมมูล Shunt Admittance ที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลที่ได้จาก Frequency Dependence Resistance




รูปที่ 5.8 ค่า Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่




รูปที่ 5.9 ค่ามุมเฟสของ Impedance ในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขึ้นกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ใช้คำนวณหา Frequency Dependent Resistance

กำหนด $\rho_{cu} = 1.672*10^{-8}$ ,$\mu_{cu} = 1$ และจากการวัด Winding $r_1 = 0.026$ mm

จาก V-I method $R_{dc} = 20\ \Omega$

$$FROM \quad R_i = \frac{\rho l}{\pi(r_i^2 - r_{i+1}^2)}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{\rho l}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}}{\frac{\rho l}{\pi(r_2^2 - r_3^2)}} = \frac{(r_2^2 - r_3^2)}{(r_1^2 - r_2^2)} = \frac{A_2}{A_1} = 2$$

$$\frac{R_2}{R_3} = 2 = \frac{r_3^2}{(r_2^2 - r_3^2)} = \frac{A_3}{A_2}$$

ให้ A 1 = a

$A_2 = 2a$

$A_3 = 4a = \pi r_3^2$

$$Total\ area\ of\ winding = A_1 + A_2 + A_3 = 7a$$

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A_{total}} = \frac{\rho l}{7a} = \frac{\rho l}{\pi r_1^2}$$

$$R_3 = \frac{\rho l}{4a} = \frac{\rho l}{\pi r_3^2}$$

$$\frac{R_{dc}}{R_3} = \frac{4a}{7a} = \frac{\pi r_3^2}{\pi r_1^2} = (\frac{r_3}{r_1})^2$$

$$R_i = \frac{\rho l}{A_i}(i = 1,2,3,4,5); \rho = 1.672*10^{-8}$$

จากทฤษฎี [10] ต้องคูณ $R_i$ ด้วย 0.9

ได้ R 3 = 31.5 Ω

R 2 = 63 Ω

R 1 = 126 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{r_1}{r_3} = \sqrt{\frac{4}{7}} \qquad , r_3 = \sqrt{\frac{7}{4}} * r_1 \qquad : find\ r_3$$

$$\frac{A_3}{A_2} = \frac{\pi r_3^2}{\pi(r_2^2 - r_3^2)} = 2 \quad , r_3^2 = 2r_2^2 - 2r_3^2 \qquad , r_2 = \sqrt{\frac{3r_3^2}{2}} \qquad : find\ r_2$$

ได้ r 1 = 0.026 mm จากการวัด

r 2 = 0.02407 mm

r 3 = 0.01965 mm

$$FROM \quad L_i = \frac{\mu(r_{i-1} - r_i)}{2\pi r_i}$$

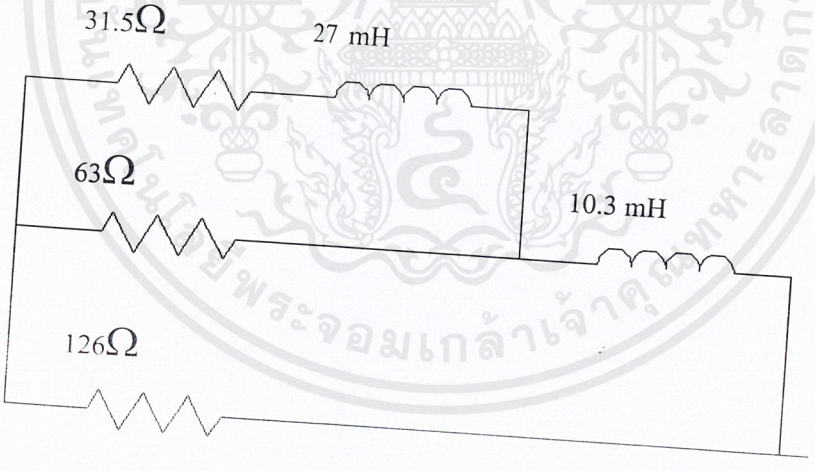
$$L_2 = \frac{\mu(r_1 - r_2)}{2\pi r_2}$$

$$L_3 = \frac{\mu(r_2 - r_3)}{2\pi r_3}$$

จากทฤษฎี [10] ต้องคูณ $R_i$ ด้วย 0.9

ได้ L 2 = 10.3 mH

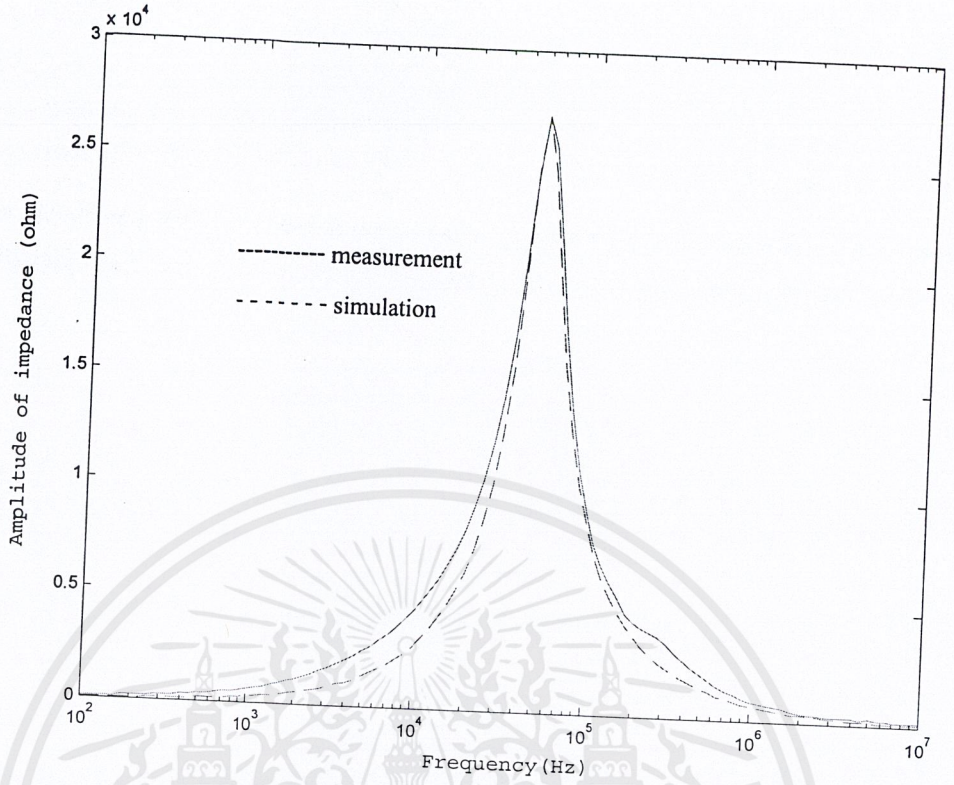
L 3 = 27 mH



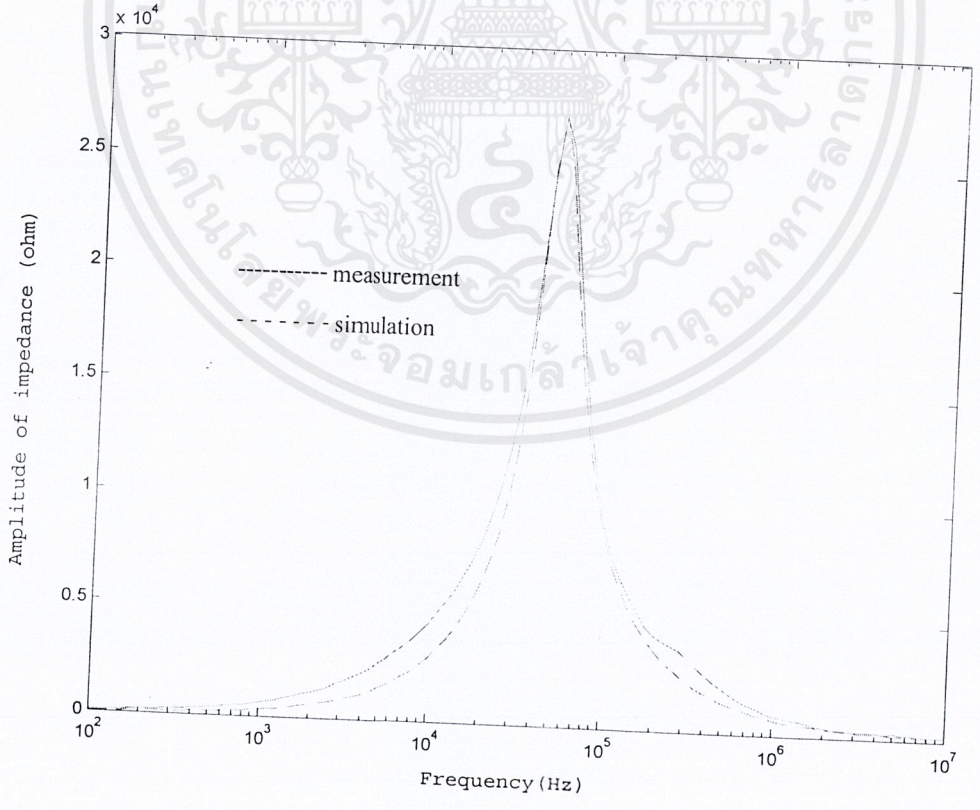

รูปที่ 5.10 วงจรสมมูล Frequency Dependence Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 เปรียบผลที่ได้จากวัดและการคำนวณโดยทฤษฎี

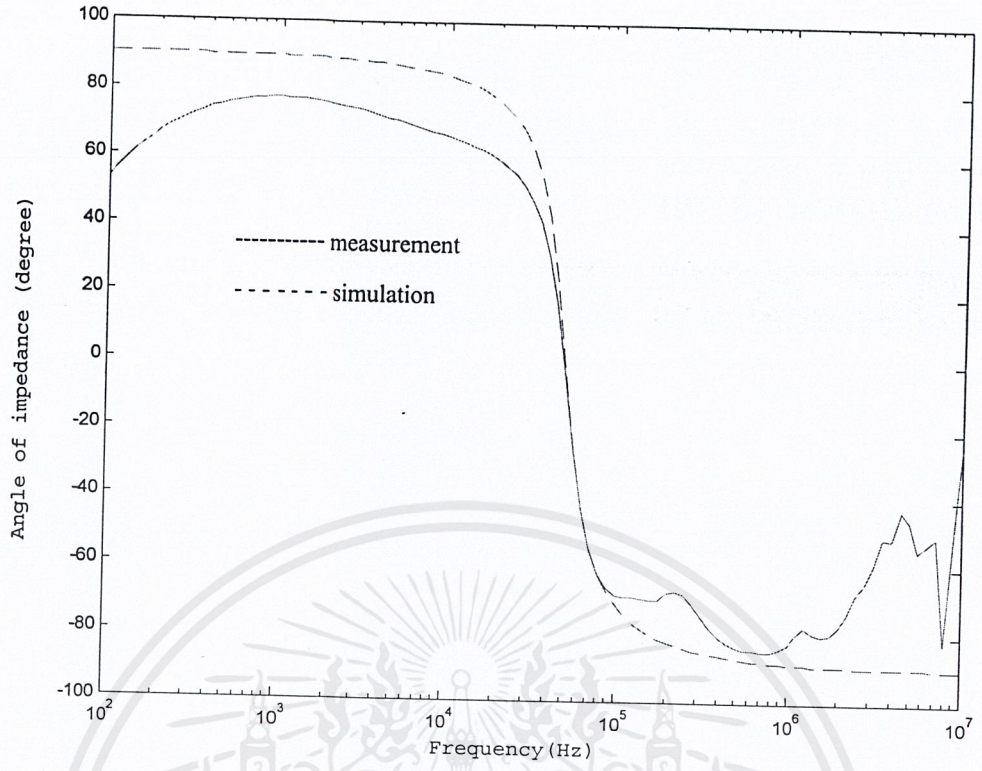



รูปที่ 5.11 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบกับค่าที่วัด

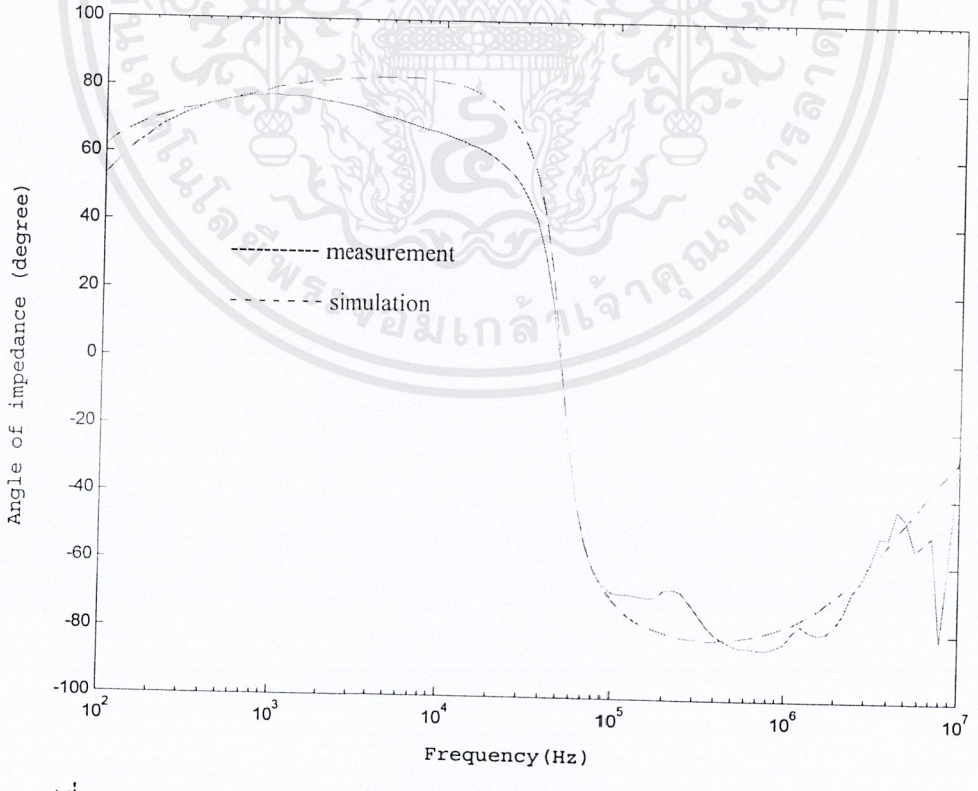



รูปที่ 5.12 กราฟของค่า Impedance ได้จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

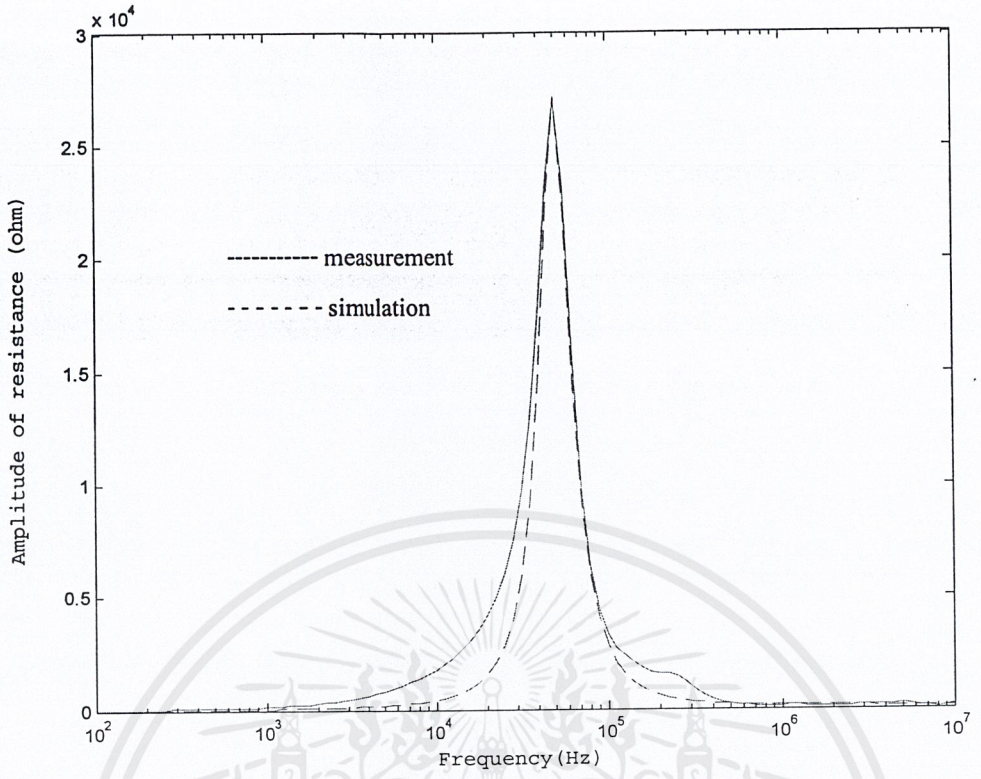



รูปที่ 5.13 กราฟของค่ามุมของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

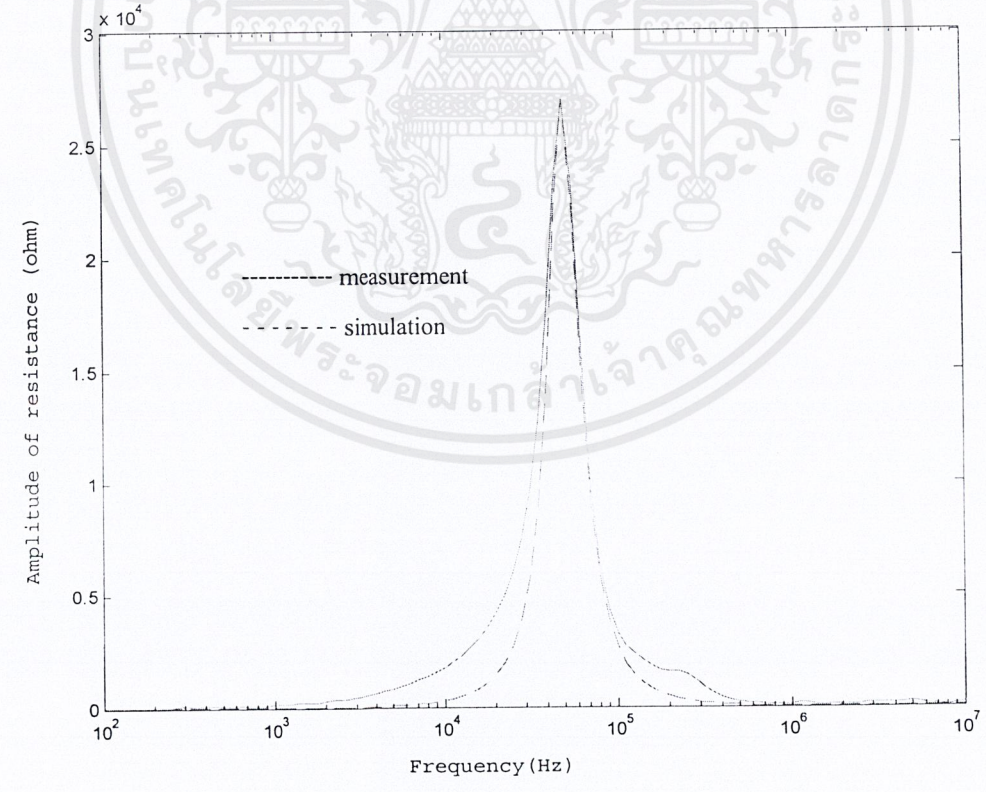



รูปที่ 5.14 ค่า มุม ของ Impedance จากวงจรสังเคราะห์ (synthesis circuit)เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

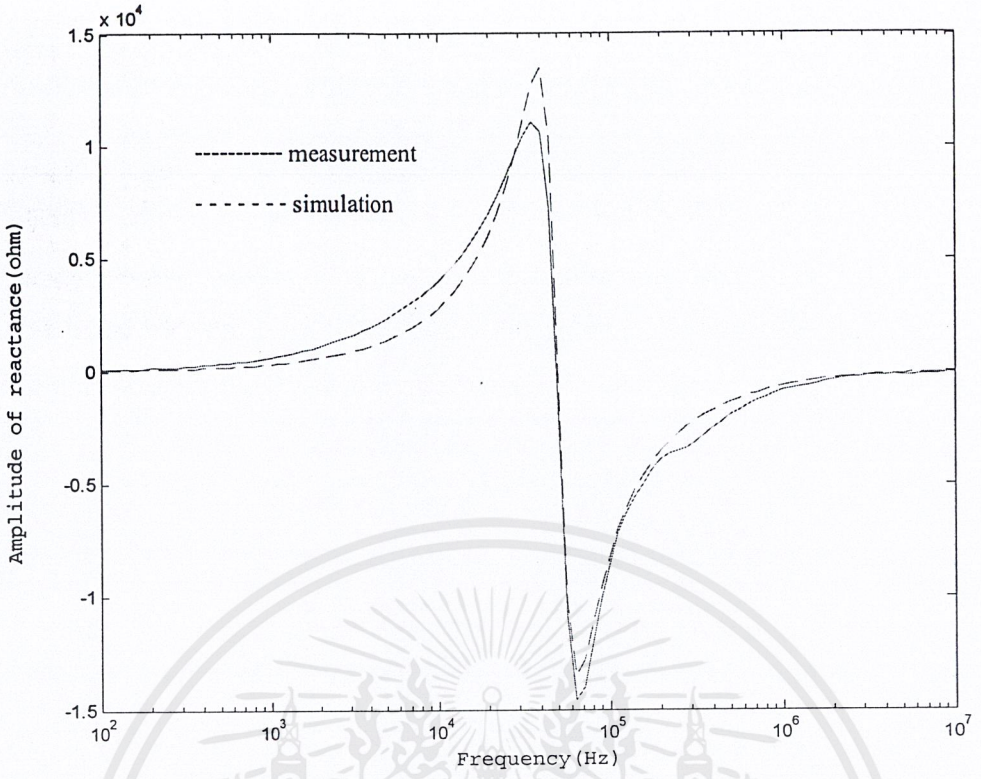



รูปที่ 5.15 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)

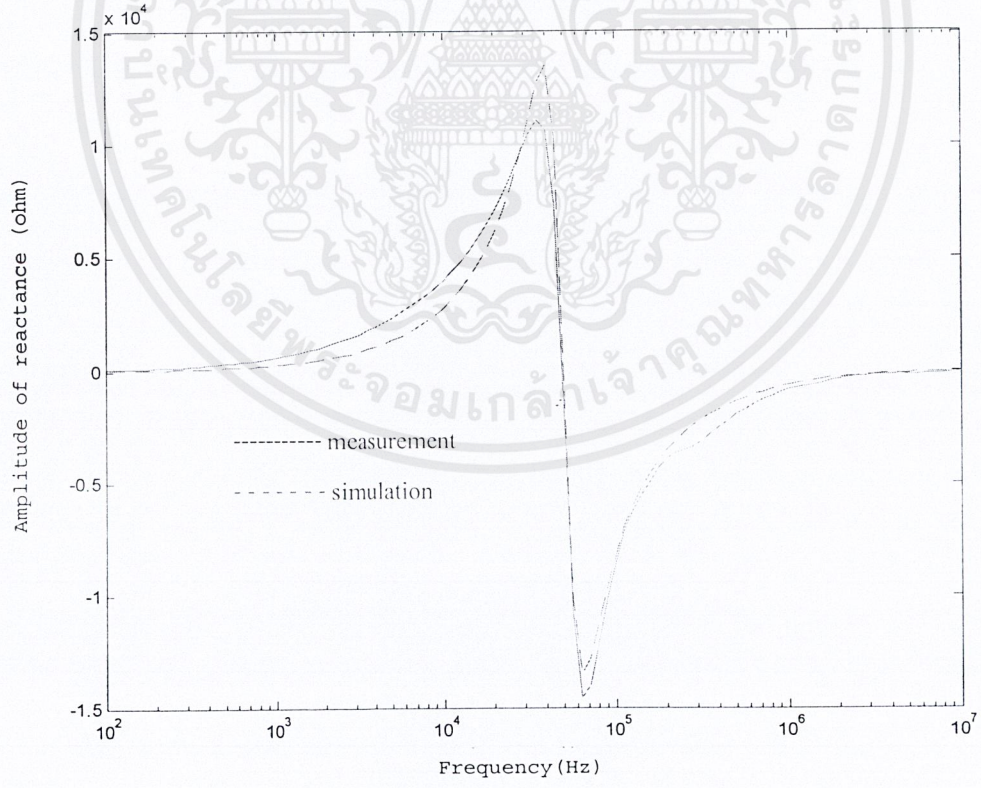



รูปที่ 5.16 กราฟของค่าส่วนจริงของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 5.17 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit)




รูปที่ 5.18 กราฟของค่าส่วนจินตภาพของ Impedanceที่ได้จากวงจรสังเคราะห์(synthesis circuit) เมื่อปรับด้วย frequency dependent resistance แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6

## สรุปและวิจารณ์

### วิจารณ์ผลการการทดลอง

จากผลที่ได้จากการวัด กราฟพารามิเตอร์ และกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เราต้องศึกษา skin effect โดยจะปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ เพื่อได้กราฟที่ได้จากการ Simulation ที่ใกล้เคียงกับผลของการวัดมากที่สุด โดย Model ที่ได้กับ Motors หลายตัวใน Model เดียว แต่ต้องเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ และจำนวนชั้น โดยอาจจะนำไปพัฒนาเป็นการเปลี่ยนโดยอัตโนมัติได้

### สรุปผลการทดลอง

1. Model สามารถใช้เป็นตัวแทนของ Induction Motor ได้ทุกๆพิกัด จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าเมื่อ Model กับ Motor พิกัดขนาดกำลัง 2Hp 1Hp และ 0.5Hp มีผลของการ simulate ใกล้เคียงกับผลจากการวัดมาก ดังนั้น Model นี้ จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของ Motor ได้ทุกๆพิกัดกำลัง โดยต้องปรับค่าพารามเตอร์ต่างๆของ Model ใช้ให้เหมาะสมกับ Motor พิกัดกำลังต่างๆ

2. เมื่อพิกัดกำลังมอเตอร์มีขนาดเล็กลง มีแนวโน้มว่าจำนวนชั้นของ Frequency dependent resistance จะมีจำนวนชั้นที่ลดลง อธิบายโดยจากการเปรียบเทียบผลการ simulate ของผลจากการวัด ที่พิกัดกำลัง Motor 2Hp จำนวนชั้นของ Frequency dependent resistanceมีจำนวนที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 ชั้น โดยมีผลของค่าความผิดพลาดของ $|z|$ =558.64 $\Omega$ ที่ Motor พิกัดกำลัง 1Hp จำนวนชั้นของ Frequency dependent resistance ที่เหมาะสมที่สุดคือ 3 ชั้น โดยมีผลของค่าความผิดพลาดของ $|z|$ =511.95 $\Omega$ ซึ่งน้อยที่สุด เมื่อใช้ Frequency dependent resistance จำนวน 3 ชั้น และที่พิกัดกำลัง Motor 0.5 จะมีจำนวนชั้น Frequency dependent resistance ที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 3 ชั้น โดยมีผลของค่าความผิดพลาดของ $|z|$ =597.91 $\Omega$

3. การตัดสินใจเลือกจำนวนชั้นของ Frequency dependent resistance ไม่สามารถตัดสินใจโดยดูผลจากค่าความผิดพลาดเท่านั้น ผลเปรียบเทียบการคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างผลจากการวัดและผลจากการ simulate ของ Model ของมอเตอร์พิกัดกำลัง 2 Hp เมื่อใช้ Frequency dependent resistance จำนวน 3 ชั้น และ 4 ชั้น พบว่าเมื่อใช้ Frequency dependent resistance จำนวน 3 ชั้น จะมีผลของค่าความผิดพลาดของ $|z|$ =568.34 $\Omega$ และมีค่าความผิดพลาดของ $\phi(z)$ เท่ากับ 6.47 degree และเมื่อใช้ Frequency dependent resistance จำนวน 4 ชั้น จะมีผลของค่าความผิดพลาดของ $|z|$ =558.64 $\Omega$ และมีค่าความผิดพลาดของ $\phi(z)$ เท่ากับ 6.48 degree จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของ $\phi(z)$ เมื่อใช้ Frequency dependent resistance 3 ชั้น ต่ำกว่าและมีค่าความผิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ $\phi(z)$ เมื่อใช้ Frequency dependent resistance 4 ชั้น แต่จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของ $|z|$ เมื่อใช้ Frequency dependent resistance 4 ชั้น นั้นน้อยกว่าค่าความผิดพลาดของ $|z|$ เมื่อใช้ Frequency dependent resistance 3ชั้น จากผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องเลือก จำนวนชั้นของ Model Frequency dependent resistance โดยผู้ใช้

4.สามารถประยุกต์นำเอาที่การทำการทดลองมาทำการทดสอบหลายๆพิกัดกำลังโดยวิธีของ Neural Network Analysis ต่อไปโดยจะสามารถเลือกจำนวนชั้นของ Frequency dependent resistance เพื่อใช้ได้ Model ที่ใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด

**ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข**

1. Variac 3 phase unbalance แก้โดย รอซ่อมเสร็จ
2. ใช้เครื่องมือผิดประเภทโดยนำ Ammeter AC ไปวัด ไฟกระแสตรง
3. กราฟที่ได้ไม่ต่อเนื่อง แก้โดย ทำการทดลองหลายๆครั้ง
4. ขณะวัดค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แก้โดย ศึกษาการปรับค่าเครื่องมือวัด
5. มีบางจุดที่ไม่สอดคล้องกับทฤษฎี แก้โดย ศึกษาทฤษฎีเพิ่มเติม
6. เครื่องวัดไม่มีความละเอียดเพียงพอ แก้โดย หาอุปกรณ์ที่ดีกว่า
7. ไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่า แก้โดย ขอใช้อุปกรณ์ที่ศูนย์บริการพัฒนาทางวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอพระคุณ ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์ ที่คอยเป็นห่วงและให้คำแนะนำในยามที่เกิดปัญหา ตลอดจนขอขอบคุณอาจารย์ในในภาควิชาไฟฟ้าทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในด้านต่างๆ ขอขอบคุณศูนย์พัฒนาทางวิศวกรรมศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เป็นอย่างดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่และเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง

[1] Induction motor Testing, 'เอกสารประกอบการทดลอง',เรื่อง การหา Parameter ของ Equivalent circuit of induction motor,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

[2] A.symlyen and A.deri, 'Time Domain Modeling of frequency dependent three-phase transmission line impedance', the IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-104, No.6, June 1985, P1549-1555

[3] Prof. J.R.Smith and W.W.Bell, 'Selection of transmission circuit models for Power-system transient studies' IEE Proceedings, Vol.131.Pt.C, No.1, January 1984, P1-4

[4] A.Kunakorn,J.Hiley and K.S.Smith , 'Frequency Dependent time domain models for calculating'

[5] Switching transients in PWM drives, 'International Conference on Power system technology', December 2000,Perth, Australia

[6] J.R. Marti, 'Accurate of frequency-dependent transmission lines in Electromagnetic Transient Simulation' IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No. 1, January 1982

[7] Cocharn and Paul L., 'Polyphase Induction Motor: Analysis, Design and Application' Marcel Dekker, November, 1989

[8] Johnson, David E., 'Electric Circuit Analysis', 2nd.ed. Prentice-Hall., Englewood Clifts, 1992

[9]Van Valkenburg M.E., 'Introduction to modern network synthesis', John Wiley & Sons, 1960, Chapter5

[10]Chu-Sun Yen,Fazarinc Z. and Wheeler R.L., 'Time-domain skin effect model for transient analysis of lossy transmission line', IEEE proceeding, July 1982, pp.750-757

[11] Edwin Mc.Anderson, 'Electric Transmission Line Fundamentals', Reston Pubishing, A.Prentice-Hall, Reston, Vieginia, 1985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้