การวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเอง ในระบบไฟฟ้ากำลัง

นาย วิริยะ เจริญศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2531

ISBN 974-568-695-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014156

i17429126

ANALYSIS OF SPONTANEOUS LOW FREQUENCY OSCILLATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Mr. Wiriya Charoensinlapa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirments
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1988

ISBN 974-568-695-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง

โดย นาย วิริยะ เจริญศิลป์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

.....กรรมการ

(นาย ไกรสีห์ กรรณสูต)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วิรัยะ เจริญศิลป์ : การวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง (ANALYSIS OF SPONTANEOUS LOW FREQUENCY OSCILLATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, 242 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับธรรมชาติและการหน่วงของออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการหน่วงของออสซิลเลชันความถี่ต่ำ ออสซิลเลชันดังกล่าวนี้ อาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพเชิงไดนามิคซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติการของระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาสำหรับวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง โปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้วิเคราะห์ค่าไอเก็นซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับออสซิลเลชันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา พลังงานไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

WIRIYA CHAROENSINLAPA : ANALYSIS OF SPONTANEOUS LOW FREQUENCY OSCILLATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SUKUMVIT PHOOMVUTHISARN, Ph.D. 242 pp.

This thesis describes the nature and damping of spontaneous low frequency oscillations in electric power systems including various factors affecting the damping of the oscillations. These oscillations may cause dynamic instability problem in operation of electric power systems. A part of the thesis pertains to a computer program developed specifically for study of the oscillations in electric power systems. The program provides eigenvalue analysis of the oscillations associated with rotor oscillations of generators in electric power systems.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา พลังงานไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล อาจารย์ ไกรสีห์ กรรณสูต และ รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล ซึ่งท่านทั้งหลายได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และอำนวยความสะดวกในการวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูปภาพ ..... ฒ

สัญญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ ..... ด

บทที่

1. บทนำและที่มาของปัญหา..... 1

2. การหน่วงของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 3

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียว ต่ออยู่กับอินฟินิตบัส..... 5

2.1.1 สาเหตุของการหน่วงแบบลบ..... 6

2.1.1.ก ผลของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต่อการหน่วง..... 6

2.1.1.ข ผลของระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต่อการหน่วง..... 6

2.1.2 การสร้างสัญญาณเพื่อการหน่วงบวก..... 9

3. ปัญหาออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลังในแง่ของเสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลัง 13

3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลังในสเตทสเปซ 14

3.1.1 ผลตอบสนองอิสระของระบบไฟฟ้ากำลัง 15

3.1.2 ปัญหาในทางปฏิบัติของการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลังในสเตทสเปซ 17

3.2 การวิเคราะห์ออสซิลเลชันและการหน่วงของออสซิลเลชันในโดเมนของความถี่ 20

3.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสและมีสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เป็นสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นอันดับสอง 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียว ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสและมีสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เป็นสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นอันดับสูง 23
3.2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง ... 25
4. แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 26
4.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 29
4.1.1 สมการฟลักซ์คล้องและสมการแรงดันของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 29
4.1.2 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 32
4.1.3 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 37
4.2 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 41
4.2.1 สมการฟลักซ์คล้องและสมการแรงดันของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 41
4.2.2 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 42
4.2.3 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 44
4.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 48
4.3.1 สมการฟลักซ์คล้องและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 48
4.3.2 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 48
4.3.3 ความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 49
4.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 51
4.4.1 สมการฟลักซ์คล้องและสมการแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 1 54
4.6 รูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันของวงจรสมมูลของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 54
4.7 การอิ่มตัวทางแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 57
5. แบบจำลองของระบบเอกไซเตชัน ระบบควบคุมความเร็ว และอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 58
5.1 แบบจำลองระบบเอกไซเตชัน 58
5.1.1 แบบจำลองของเอร์เรอร์ดีเทกเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน 61
5.1.2 แบบจำลองของเอกไซเตอร์ 64
5.1.2.1 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรง ชนิดหมุน 65
5.1.2.2 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับ ชนิดหมุน 66
5.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบเอกไซเตชัน 68
5.3 แบบจำลองของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 71
5.4 แบบจำลองของระบบควบคุมความเร็ว 71
6. ระบบสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับตัวแปรอินครีเมนตอลของแรงดันที่บัสของระบบไฟฟ้ากำลังในโดเมนความถี่เชิงซ้อน 72
7. ระบบสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุม 81
7.1 สมการแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโดเมนความถี่เชิงซ้อน 81
7.2 สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโดเมนความถี่เชิงซ้อน 84
7.3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลในส่วนของเอร์เรอร์ดีเทกเตอร์และอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 88

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.4 สมการฟลักซ์คล้องในแนวแกนตรง 91

7.5 สมการฟลักซ์คล้องในแนวแกนตั้งฉาก 96

8. การหาค่าของค่าไอเก็นของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งสัมพันธ์กับออสซิลเลชัน ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ วิธีการโดเมนความถี่เชิงซ้อน 108

8.1 การหาค่าของตัวแปรอินครีเมนตอลของแรงดันที่ขั้ว และแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโดเมนเชิงซ้อน 108

8.2 การหาค่าเฟสเซอร์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของความเร็วเชิงมุม ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 110

8.3 การหาค่าของแรงบิดจากภายนอก 110

8.4 การหาค่าพีคของพลังงานจลน์ 110

8.5 การประเมินค่าของค่าไอเก็น 111

8.6 ขั้นตอนวิธีของการค้นหาค่าของค่าไอเก็น 111

9. การศึกษาออสซิลเลชันและการหน่วงของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น 116

9.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 116

9.2 ผลของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่มีต่อเสถียรภาพเชิงไดนามิค ของระบบไฟฟ้ากำลัง 117

9.3 ผลของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่มีต่อการหน่วงของ ออสซิลเลชันในโมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 118

9.4 ผลของอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่มีต่อการหน่วง 118

10. สรุปและข้อเสนอแนะ 128

10.1 สรุปผล 128

10.2 ข้อเสนอแนะ 129

เอกสารอ้างอิง 130

ภาคผนวก ก. ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ และ ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ 132

ภาคผนวก ข. ความสัมพันธ์ของรีแอกแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรไฟฟ้าในแนวแกนตรงของโรเตอร์ กับ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ และ ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ 134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวในแบบจำลองเชิงเส้นชนิดแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับค่า ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ และ รีแอกแตนซ์ซิ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว .. 137

ภาคผนวก ง. การใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง 146

ง.1 การเข้าสู่โปรแกรม LFO 146

ง.2 การป้อนข้อมูลผ่านทางแป้นพิมพ์ 147

ง.3 การพิมพ์ข้อมูลลงในไฟล์ข้อมูล 153

ง.4 การแก้ไขข้อมูล 154

ง.5 ไฟล์ข้อมูลสำรอง 161

ง.6 ไฟล์บันทึกคำตอบของโปรแกรม LFO 161

ภาคผนวก จ. โปรแกรมวิเคราะห์ออสซิลเลชันความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นเองในระบบไฟฟ้ากำลัง 171

ประวัติผู้เขียน 242

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 บล็อกไดอะแกรมของสมการสวิง 4

2.2 รากของสมการลักษณะสมบัติของสมการสวิง..... 4

2.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัส..... 7

2.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสอย่างง่ายซึ่งเกิดจากการลดรูปบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.3 8

2.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์เข้ากับระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 10

2.6 บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับอินฟินิตบัสในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ เข้ากับระบบเอกไซเตชันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 11

4.1 วงจรสมมูลย์แนวแกนตรง และ วงจรสมมูลย์แนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2, 3, 4, และ 5 27

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงของระบบไฟฟ้ากำลังกับแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 27

4.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 38

4.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 38

4.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตรง ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 45

4.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 4 45

4.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

4.8 ตัวอย่างเส้นโค้งของการอิ่มตัวทางแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ... 52
5.1 แบบจำลองของระบบเอกไซเตชันชนิดต่าง ๆ 60
5.2 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของเอร์เรอร์ดีเทกเตอร์
ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน 63
5.3 แบบจำลองเชิงเส้นของเอร์เรอร์ดีเทกเตอร์
ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน 63
5.4 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุน 63
5.5 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสตรงชนิดหมุน 67
5.6 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน
ซึ่งแรงดันป้อนกลับ นำมาจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก 67
5.7 แบบจำลองเชิงเส้นของเอกไซเตอร์กระแสสลับชนิดหมุน
ซึ่งแรงดันป้อนกลับ นำมาจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก 67
5.8 แบบจำลองทั่วไปของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 1, 2, 3, และ 6 70
5.9 แบบจำลองของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 70
5.10 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบควบคุมความเร็ว 71
7.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
กับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 86
7.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์เชิงไดนามิคของตัวแปรอินครีเมนตอล
ในส่วนของระบบเอกไซเตชันและอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 86
8.1 โฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนวิธีการหาค่าของค่าไอเก็น 112
9.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 119
ง.1 การจัดลำดับบรรทัดข้อมูลในไฟล์ข้อมูล 170

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 คำอธิบายเกี่ยวกับค่าคงตัวในรูปที่ 2.1 5

4.1 หมายเลขอ้างอิงของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และคำอธิบาย 28

4.2 ค่าคงตัวทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ 28

4.3 สัญลักษณ์และคำจำกัดความของค่าเบส ของตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 31

4.4 ค่าคงตัวซึ่งใช้ในสมการไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 31

4.5 ค่าคงตัวซึ่งใช้ในสมการไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 39

4.6 ค่าคงตัวซึ่งใช้ในสมการไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 39

4.7 แสดงค่าคงตัวในสมการไดนามิคในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ 46

4.8 แสดงค่าคงตัวในสมการไดนามิคในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ 53

4.9 แสดงการสมนัยกันของแรงดันภายในและค่ารีแอกแตนซ์ในสมการแรงดันภายใน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ 53

4.10 แสดงการแปลงโคออร์ดิเนตของตัวแปรจากโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไปยังโคออร์ดิเนตอ้างอิงและจากโคออร์ดิเนตอ้างอิงไปยังโคออร์ดิเนตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 56

4.11 แสดงสมการแรงดันของวงจรสมมูลของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ 56

5.1 ระหัสของแบบจำลองของระบบเอกไซเตชันแต่ละชนิดพร้อมคำอธิบาย .. 60

5.2 สัญญลักษณ์ของตัวแปรและค่าคงตัวในแบบจำลองของเอร์เรอร์ดีเทกเตอร์ 62

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

5.3 ค่าคงตัวและค่าคงตัวทางเวลาของระบบเอกไซเตชันชนิดต่าง ๆ 69

6.1 สัญญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในบทที่ 6 73

6.2 สัญญลักษณ์ของตัวแปรอินครีเมนตอลซึ่งใช้ในบทที่ 6 74

6.3 แสดงค่าของสมาชิกของเมตริกซ์ [A] 74

6.4 สมาชิกของเมตริกซ์ [B] ซึ่งไม่เป็นศูนย์ 80

7.1 อนุพันธ์ย่อยของแรงดันภายในเมื่อเทียบกับมุมของโรเตอร์ 82

7.2 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรในสมการ (7.83) ซึ่งมีค่าไม่ขึ้นกับ
โอเปอร์เรเตอร์เชิงซ้อน 101

7.3 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรในสมการ (7.83) ซึ่งมีค่าขึ้นกับ
โอเปอร์เรเตอร์เชิงซ้อน 104

7.4 สมาชิกของเมตริกซ์ [C] ซึ่งไม่เป็นศูนย์ 107

7.5 สมาชิกของเมตริกซ์ [D] ซึ่งไม่เป็นศูนย์ 107

9.1 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 120

9.2 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 121

9.3 ข้อมูลของหม้อแปลงของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 121

9.4 ข้อมูลของบัสต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 122

9.5 ข้อมูลของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่บัสต่าง ๆ
ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 123

9.6 ค่าไอเก็นในโมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ 124

9.7 ตัวอย่างของคำตอบจากการคำนวนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
ในแต่ละวงรอบของการค้นหาค่าของค่าไอเก็น 124

9.8 ตัวอย่างของความเร็วเบี่ยงเบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของ
ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ซึ่งคำนวนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
ภายหลังจากการค้นหาค่าของค่าไอเก็นในตารางที่ 9.7
ประสบผลสำเร็จแล้ว 125

9.9 สัณฐานโมดของออสซิลเลชันของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ
ในโมดต่าง ๆ 125

9.10 คอมบิเนชันต่าง ๆ ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ และ ค่าไอเก็น
ในโมดที่มีความถี่ต่ำสุดซึ่งสมนัยกับแต่ละคอมบิเนชัน 126

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

9.11 ค่าไอเก็นในโมดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ ภายหลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่บัส 6 126
9.12 ข้อมูลของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่ติดตั้งที่บัส 6 127
9.13 ผลของอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 6 ที่มีต่อค่าไอเก็นซึ่งสมนัยกับออสซิลเลชันในโมดซึ่งมีความถี่ต่ำที่สุด 127
ง.1 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 162
ง.2 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 2 162
ง.3 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลของสายส่ง 163
ง.4 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลของหม้อแปลง 163
ง.5 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลบัส 164
ง.6 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 164
ง.7 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 2 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 165
ง.8 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 3 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 165
ง.9 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 ของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 1, 2, และ 6 166
ง.10 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 ของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 3 166
ง.11 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 2 ของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 1 และ 2 167
ง.12 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 2 ของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 3 167
ง.13 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 2 ของระบบเอกไซเตชันชนิดที่ 6 168
ง.14 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 ของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 168
ง.15 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 2 ของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 168
ง.16 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 ของระบบควบคุมความเร็ว 169
ง.17 ฟอร์แมตของบรรทัดข้อมูลแบบที่ 1 ของระบบควบคุมความเร็ว 169

สัญญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

K_S = สัมประสิทธิ์ของการซิงโครไนซ์ (Synchronizing Coefficient)

K_D = สัมประสิทธิ์ของการหน่วง (Damping Coefficient)

T_M = แรงบิดเชิงกล (Mechanical Torque)

T_S = แรงบิดซิงโครไนซ์ (Synchronizing Torque)

T_D = แรงบิดหน่วง (Damping Torque)

T_E = แรงบิดเชิงไฟฟ้า (Electrical Torque)

ω_R = ความถี่เชิงไฟฟ้าระบุ (Nominal Electrical Frequency)

δ = มุมโรเตอร์ (Rotor Angle)

ω = ความเร็วเชิงมุม,ความถี่เชิงไฟฟ้า

p = ดิฟเฟอร์เรนเชียลโอเปอร์เรเตอร์ (Differential Operator)

λ_D = ฟลักซ์คล้อง (Flux Linkage) ในแนวแกนตรง (Direct Axis) ของสเตเตอร์ (Stator)

λ'_D = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตรงของสเตเตอร์ในช่วงทรานเซียนต์ (Transient)

λ''_D = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตรงของสเตเตอร์ในช่วงซับทรานเซียนต์ (Subtransient)

λ_Q = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis) ของสเตเตอร์

λ'_Q = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์ในช่วงทรานเซียนต์

λ''_Q = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์ในช่วงซับทรานเซียนต์

λ_{FD} = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตรงของโรเตอร์ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากกระแสของวงจรสนาม (Field Circuit)

λ_{SD} = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตรงของโรเตอร์ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากกระแสของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตรง (Direct Axis Subtransient Circuit)

λ_{FQ} = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากกระแสของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis Equivalent Circuit)

λ_{SQ} = ฟลักซ์คล้องในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากกระแสของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉาก (Quadrature Axis Subtransient Circuit)

L_{MD} = ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) ของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงของโรเตอร์

L_{FD} = ความเหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว (Leakage Inductance) ของวงจรสนาม

L_{SD} = ความเหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

L_{MQ} = ความเหนี่ยวนำร่วมของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

L_{FQ} = ความเหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่วของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

L_{SQ} = ความเหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

L_{A} = ความเหนี่ยวนำซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงและวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์

X_{MD} = รีแอกแตนซ์ร่วม (Mutual Reactance) ของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงของโรเตอร์

X_{FD} = รีแอกแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว (Leakage Reactance) ของวงจรสนาม

X_{SD} = รีแอกแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

X_{MQ} = รีแอกแตนซ์ร่วมของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

X_{FQ} = รีแอกแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่วของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

X_{SQ} = รีแอกแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

X_{A} = รีแอกแตนซ์ซึ่งพิจารณาจากฟลักซ์รั่ว ของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงและวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์

X_{D} = รีแอกแตนซ์ของวงจรสมมูลแนวแกนตรง

X'_{D} = ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของสเตเตอร์

X''_{D} = ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ของวงจรสมมูลแนวแกนตรงของสเตเตอร์

X'_{Q} = ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์

X''_{Q} = ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์

X_{Q} = รีแอกแตนซ์ของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก

R_A = ความต้านทานของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงและวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์

R_{FD} = ความต้านทานของวงจรสนาม

R_{SD} = ความต้านทานของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตรงของโรเตอร์

R_{FQ} = ความต้านทานของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

R_{SQ} = ความต้านทานของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

I_{FD} = กระแสของวงจรสนาม

I_{SD} = กระแสของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตรงของโรเตอร์

I_{FQ} = กระแสของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

I_{SQ} = กระแสของวงจรซับทรานเซียนต์ในแนวแกนตั้งฉากของโรเตอร์

I_D = กระแสของวงจรสมมูลในแนวแกนตรงของสเตเตอร์

I_Q = กระแสของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของสเตเตอร์

E_D = แรงดันที่ขั้วของวงจรสมมูลในแนวแกนตรง ของสเตเตอร์

E_Q = แรงดันที่ขั้วของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉาก ของสเตเตอร์

E'_D = แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรง ในช่วงทรานเซียนต์

E''_D = แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตรง ในช่วงซับทรานเซียนต์

E'_Q = แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก ในช่วงทรานเซียนต์

E''_Q = แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก ในช่วงซับทรานเซียนต์

T'_{DO} = ค่าคงตัวทางเวลาชนิดวงจรเปิดของวงจรสมมูลแนวแกนตรง ในช่วงทรานเซียนต์ (Direct Axis Transient Open Circuit Time Constant)

T''_{DO} = ค่าคงตัวทางเวลาชนิดวงจรเปิดของวงจรสมมูลแนวแกนตรง ในช่วงซับทรานเซียนต์ (Direct Axis Transient Open Circuit Time Constant)

T'_{QO} = ค่าคงตัวทางเวลาชนิดวงจรเปิดของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก ในช่วงทรานเซียนต์ (Quadrature Axis Transient Open Circuit Time Constant)

T''_{QO} = ค่าคงตัวทางเวลาชนิดวงจรเปิดของวงจรสมมูลแนวแกนตั้งฉาก ในช่วงซับทรานเซียนต์ (Direct Axis Transient Open Circuit Time Constant)

H = ค่าคงตัวแห่งความเฉื่อย (Inertia Constant)

D = ค่าคงตัวแห่งการหน่วง (Damping Coefficient)