การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

นายวิชัย ลิวรานันตกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2530

ISBN 974-568-206-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

012892

ELECTROMAGNETIC TRANSIENT ANALYSIS IN ELECTRIC POWER SYSTEM

Mr.Vichai Chivaranuntakul

A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1987

10299579

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

โดย นายวิชัย ลิวรานันตกุล

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

(นายไกรลีห์ กรรณสูต)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชื่อนิสิต นายวิชัย จิรวรานันตกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2529

พลสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงวิธีการหาผลลัพธ์ของทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง และแสดงรายละเอียดของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น โปรแกรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการศึกษาเสถียรภาพเนื่องจากฟ้าผ่าและการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสวิทชิงเสถียร เพื่อประโยชน์ในการเลือกระดับฉนวนให้เหมาะสม ตลอดจนวิเคราะห์ปัญหาแรงดันเกิน

Thesis Title Electromagnetic Transient Analysis in Electric Power System

Name Mr.Vichai Chivaranuntakul

Thesis Advisor Associate Professor Sukumvit Phoomvuthisarn, Ph.D.

Department Electrical Engineering

Academic Year 1986

ABSTRACT

This thesis presents a computer method for solving Electromagnetic Transient in Electric Power System. A computer program was developed and is described. The program can apply to study lightning surge and simple switching surge event for insulation design including overvoltage analysis.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความสนับสนุนและความร่วมมือจากหลายท่านด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำปรึกษาและควบคุมวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.จรวย บุญยุบล ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคุณไกรลีห์ กรรณสูต หัวหน้ากองระบบรีเลย์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ช่วยแก้ไขบทความและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย 2

การดำเนินการวิจัย 3

ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย 4

ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย 4

2 ทฤษฎีหลักในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 5

บทนำ 5

การแทนสายส่ง 5

วิธีลักษณะสมบัติของเบอร์เจอรอน 5

วงจรสมมูลย์อิมพีแดนซ์สำหรับสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย (Lossless Line) โดยใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed Parameter) 11

วงจรสมมูลย์ชนิดพาย (PI Equivalent Circuit) 13

การแทนสายส่งไฟฟ้าที่มีหลายเฟส (Multiphase Line) 15

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าจากขนาดและรูปร่างของเส้าไฟฟ้า 17

วงจรสมมูลย์สำหรับโหลดต่าง ๆ โดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน (Lumped Parameter) 24

วงจรสมมูลย์สำหรับอินดักแตนซ์ 24

หน้า

วงจรสมมูลย์สำหรับคาแปซิแตนซ์ 25
วงจรสมมูลย์สำหรับความต้านทาน 26
พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Parameter).. 27
การบันทึกข้อมูลที่ช่วงเวลาก่อน (Past History Data) 28
3 การแทนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า .. 29
บทนำ 29
ชนิดของทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง 29
โมเดลของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 32
สายส่งไฟฟ้า 32
หม้อแปลง 33
รีแอคเตอร์ 34
แหล่งกำเนิดแรงดัน 34
เซอร์กิตเบรคเกอร์ 35
กับดักฟ้าผ่า 35
วงจรสมมูลย์ของระบบขนาดใหญ่ 36
การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าด้วยปัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ 38
สมการระบบไฟฟ้า 38
การแก้สมการโหนด 39
เทคนิคการแก้สมการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอิลิเมนต์ของวงจร 43
4 โปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 56
บทนำ 50
โครงสร้างของโปรแกรม 50
การอ่านข้อมูลของโปรแกรม 52
การจัด Topology ของวงจรจากข้อมูลอินพุท 52
การจัดลำดับของโหนดใหม่ (Ordering) 53
การแปลงข้อมูลอินพุทแต่ละชนิดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน 53

หน้า

การเตรียมตารางบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ 54
การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์และทำ Triangular Factorization 54
การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นก่อนการคำนวณ 54
การคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของช่วงเวลา 55
การแสดงวงจรการเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ 66
ทรานเซียนต์ขณะสับเซอร์กิตเบรคเกอร์ 66
ทรานเซียนต์ขณะสับคาร์แปซิเตอร์ 67
ทรานเซียนต์ของการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนต์ 68
ทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่า 68
5 การใช้โปรแกรมและตัวอย่างการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 70
บทนำ 70
การป้อนข้อมูล 70
โปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง 70
โปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 73
ตัวอย่างการวิเคราะห์ 81
การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง 81
การวิเคราะห์ Step Response ของแรงดันอิมพัลส์ 92
การวิเคราะห์เกี่ยวกับ Lightning Surge 95

6 สรุปและข้อเสนอแนะ 98

เอกสารอ้างอิง 100

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงลักษณะสมบัติของสายนำไฟฟ้า 104
ภาคผนวก ข. โปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้า 110
ภาคผนวก ค. พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า 139
ภาคผนวก ง. การแก้สมการโหนดโดยอาศัยเทคนิคการทำออปติไมเซชัน 145

หน้า

ภาคผนวก จ. โปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 161

ภาคผนวก ฉ. คู่มือการใช้โปรแกรม 217

ประวัติผู้เขียน 227

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ประมาณแถบความถี่ที่คาดไว้สำหรับแต่ละชนิดของทรานเซียนต์	30
3.2	ชนิดของแรงดันเกินที่สัมพันธ์กับแถบความถี่	31
3.3	สมการโหนดของวงจรรูป 3.8	42
5.1	การใส่ข้อมูลของสายส่งชุดที่ 3	71
5.2	การใส่ข้อมูลของสายส่งชุดที่ 4	73
5.3	ข้อมูลควบคุมโปรแกรม	75
5.4	ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับ Branch Data	76
5.5	ชุดของข้อมูลอินพุทสำหรับพารามิเตอร์แบบก้อน	76
5.6	ชุดของข้อมูลอินพุทของวงจรสมมูลย์ชนิดพาย	77
5.7	ชุดของข้อมูลอินพุทของสายส่งที่ใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย	77
5.8	ชุดของข้อมูลอินพุทของพารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้น	78
5.9	ชุดของข้อมูลอินพุทของสวิทช์	78
5.10	ชุดของข้อมูลอินพุทของแหล่งกำเนิดแรงดัน	79
5.11-5.12	การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งทางเทอร์มินัล	82
5.13	การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งผ่านทางไฟล์อินพุท...	84
5.14-5.20	แสดงผลลัพธ์ของการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง	85
5.21	แสดงข้อมูลอินพุทของการวิเคราะห์ Step Response ของแรงดันอิมพัลส์..	94
5.22	แสดงข้อมูลอินพุทของการวิเคราะห์เกี่ยวกับ Lightning Surge	97
6.1	แสดงจำนวนสูงสุดของข้อมูลที่สามารถใช้งานได้	98
ก.1	Characteristics of Copper Conductors	104
ก.2	Characteristics of Copper Conductors (cont.)	105
ก.3	Characteristics of Aluminum Cable, Steel-Reinforced ...	106
ก.4	Characteristics of Aluminum Cable, Steel-Reinforced (cont.)	107
ก.5	Characteristics of Aluminum Cable, Steel-Reinforced (cont.)	108
ก.6	Characteristic of Expanded Aluminum Cable	109

ตารางที่ หน้า

ข.1 โปรแกรมย่อยในการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง 112

ค.1 Typical Positive Sequence Per Unit Impedance Value for Transformers 139

ค.2 Typical Values of Magnetizing Current 139

ค.3 Capacitance to Ground of Outdoor Bushing 140

ค.4 Sixty-Hertz Reactance Values of Synchronous Generators.. 141

ค.5 Earth Resistivities 141

ค.6 Typical Capacitance Values for Power Cables 141

ค.7 Bus Capacitances 142

ค.8 Capacitance of Potential Transformers 142

ค.9 Capacitance of Current Transformers 143

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรสมมูลย์สายส่งไฟฟ้า	6
2.2 ก	สายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสียระหว่างโหนด k และโหนด m	11
2.2 ข	วงจรสมมูลย์อิมพิแดนซ์ของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย	12
2.2 ค	แสดงตำแหน่งการต่อความต้านทานในการแทนสายส่ง	12
2.3	วงจรสมมูลย์ขนิดพายของสายส่ง	13
2.4	การทรานส์ฟอร์มสายส่ง 3 เฟสจากเฟสโดเมนเป็น Modal โดเมน ...	15
2.5	แสดงสัญญลักษณ์ตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า	18
2.6	โฟล์วชาร์ตของโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง	23
2.7 ก	อินดักแตนซ์ L ต่อระหว่างโหนด k และ m	24
2.7 ข	วงจรสมมูลย์สำหรับอินดักแตนซ์โดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน	25
2.7 ค	คาแปซีแตนซ์ C ต่อระหว่างโหนด k และ m	25
2.7 ง	วงจรสมมูลย์สำหรับคาแปซีแตนซ์โดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน	26
2.7 จ	วงจรสมมูลย์สำหรับความต้านทานโดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน	27
3.1	แสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์และกระแสของหม้อแปลง	33
3.2	แสดงรูปคลื่นฟ้าผ่าชนิดต่าง ๆ	34
3.3	แสดงวงจรสมมูลย์แบบ Foster	36
3.4	ไดอะแกรมเส้นเดียว	37
3.5	วงจรสมมูลย์กับผลของความถี่	37
3.6	วงจรแสดงการวัด Y_{22}, Y_{12} และ Y_{32}	38
3.7	การแก้สมการเชิงเส้น	40
3.8	แสดงวงจรไฟฟ้าประกอบด้วย 6 โหนด	40
3.9	วงจรสมมูลย์แทนวงจรรูป 3.8	41
3.10	วิธีการชดเชยแสดงในลักษณะวงจรสมมูลย์เทฟวนิน	42
3.11	โฟล์วชาร์ตของโปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า	48
4.1	โฟล์วชาร์ตแสดงโครงสร้างของโปรแกรม	56

รูปที่ หน้า

4.2 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการอ่านข้อมูลอินพุท 57

4.3 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการจัด Topology ของข้อมูล... 58

4.4 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการจัดลำดับเลขของโหนดต่าง ๆ. 59

4.5 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน 60

4.6 โฟล้วชาร์แล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยสำหรับสร้างตารางบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ 61

4.7 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการสร้างปัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ 62

4.8 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น 63

4.9 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า 64

4.10 โฟล้วชาร์ตแล่ดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการคำนวณทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (ต่อ) 65

4.11 แล่ดงถึงวงจรทรานเซียนต์ขณะสับเซอร์กิตเบรคเกอร์ 66

4.12 แล่ดงถึงวงจรทรานเซียนต์ขณะปลดเซอร์กิตเบรคเกอร์ 66

4.13 แล่ดงถึงวงจรทรานเซียนต์ขณะสับคาแปซิเตอร์ 67

4.14 แล่ดงถึงวงจรล่มมูลย์ในการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ 68

4.15 แล่ดงถึงวงจรในการศึกษาทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่า 69

5.1 แล่ดงรูปร่างลักษณะของเล่าไฟฟ้า 500 kV 80

5.2 แล่ดงการวางตำแหน่งล่ายไฟฟ้าในเฟล่เดียวกัน 81

5.3 วงจรวัดแรงดันอิมพัลล์ 92

5.4 ผลลัพธ์ของแรงดันที่บัล 3 93

5.5 ตัวอย่างของ Lightning Discharge 95

5.6 ก แล่ดงผลของแรงดันที่ขั้วของหม้อแปลง 97

5.6 ข แล่ดงกระแล่ที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่า 97