

การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง



นายวิชัย จิวรานันตกุล

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 สิวราวัฒน์กุล

ภาควิชา

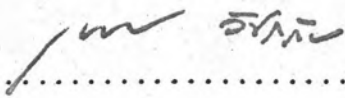
วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา


รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร

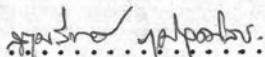


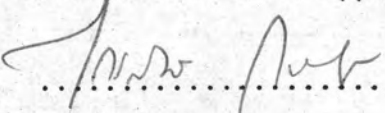
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

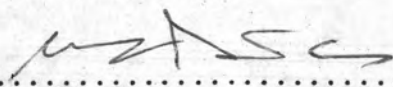

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วิชัยราษฎร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.จรววย บุญยบุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)


..... กรรมการ
(นายไกรสิทธิ์ วรรณสุต)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพฑูรย์ ไชยนิล)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชื่อผู้เขียน นายวิชัย ศิริวรรณันตกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2529



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงวิธีการหาผลลัพธ์ของทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง และแสดงรายละเอียดของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น โปรแกรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการศึกษาเส้นแรงจากฟ้าผ่าและการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสวิตชิ่งเส้นแรง เพื่อประโยชน์ในการเลือกกระดบฉนวนให้เหมาะสม 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.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความสนับสนุนและความร่วมมือจากหลายท่านด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้คำปรึกษาและควบคุมวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.จรววย บุญยกุล ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ไพฑูลย์ ไชยนิล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคุณโกรสีห์ วรรณลุต หัวหน้ากองระบบรีเลย์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ช่วยแก้ไขบทความและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๖
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๗
กิตติกรรมประกาศ	๘
สารบัญตาราง	๘
สารบัญภาพ	๙
บทที่	
1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	2
การดำเนินการวิจัย	3
ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย	4
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	4
2 ทฤษฎีหลักในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า	5
บทนำ	5
การแทนสายส่ง	5
วิธีลักษณะสัมพันธ์ของเบอร์เจอรอน	5
วงจรสมมูลย์อิมพีแดนซ์สำหรับสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย (Lossless Line) โดยใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย (Distributed Parameter)	11
วงจรสมมูลย์ขั้วนิคพาย (PI Equivalent Circuit)	13
การแทนสายส่งไฟฟ้าที่มีหลายเฟส (Multiphase Line)	15
การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าจากขนาดและรูปร่างของเสาไฟฟ้า	17
วงจรสมมูลย์สำหรับโหลดต่าง ๆ โดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน (Lumped Parameter)	24
วงจรสมมูลย์สำหรับอินดักแตนซ์	24

	ช หน้า
วงจรมุมมูลย์สำหรับคาแปซิแตนซ์	25
วงจรมุมมูลย์สำหรับความต้านทาน	26
พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Parameter)..	27
การบันทึกข้อมูลที่ย่วงเวลาก่อน (Past History Data)	28
3 การแทนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า ..	29
บทนำ	29
ชนิดของทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	29
โมเดลของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็ก ไฟฟ้า	32
สายส่งไฟฟ้า	32
หม้อแปลง	33
รีแอกเตอร์	34
แหล่งกำเนิดแรงดัน	34
เซอร์กิตเบรกเกอร์	35
กัปดักฟ้าผ่า	35
วงจรมุมมูลย์ของระบบขนาดใหญ่	36
การวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าด้วยปลัแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์	38
สมการระบบไฟฟ้า	38
การแก้สมการโหนด	39
เทคนิคการแก้สมการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัสซิเมนต์ของวงจร	43
4 โปรแกรมการวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า	56
บทนำ	50
โครงสร้างของโปรแกรม	50
การอ่านข้อมูลของโปรแกรม	52
การตัด Topology ของวงจรจากข้อมูลอินพุต	52
การลำดับของโหนดใหม่ (Ordering)	53
การแปลงข้อมูลอินพุตแต่ละชนิดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน	53

การเตรียมตารางบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ	54
การสร้างปลั๊กแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์และทำ Triangular Factorization	54
การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นก่อนการคำนวณ	54
การคำนวณหารานเขียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของช่วงเวลา	55
การแสดงวงจรการเกิดทรานเขียนต์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ	66
ทรานเขียนต์ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์	66
ทรานเขียนต์ขณะสับคาร์แปซิเตอร์	67
ทรานเขียนต์ของการเกิดเฟอร์โรเรโซแนนต์	68
ทรานเขียนต์เนื่องจากฟ้าผ่า	68
5 การใช้โปรแกรมและตัวอย่างการวิเคราะห์ทรานเขียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า	70
บทนำ	70
การป้อนข้อมูล	70
โปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง	70
โปรแกรมวิเคราะห์ทรานเขียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า	73
ตัวอย่างการวิเคราะห์	81
การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง	81
การวิเคราะห์ Step Response ของแรงดันอิมพัลส์	92
การวิเคราะห์เกี่ยวกับ Lightning Surge	95
6 สรุปและข้อเสนอนะ	98
เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงลักษณะสมบัติของสายนำไฟฟ้า	104
ภาคผนวก ข. โปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้า	110
ภาคผนวก ค. พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า	139
ภาคผนวก ง. การแก้สมการโหนดโดยอาศัยเทคนิคการทำออปติไมเซชัน	145

หน้า

ภาคผนวก จ. โปรแกรมการวิเคราะห์ฐานเขียนแม่เหล็กไฟฟ้า	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	ชุดของข้อมูลอินพุตสำหรับ Branch Data	76
5.5	ชุดของข้อมูลอินพุตสำหรับพารามิเตอร์แบบก้อน	76
5.6	ชุดของข้อมูลอินพุตของวงจรสมมูลชนิดพาย	77
5.7	ชุดของข้อมูลอินพุตของสายส่งที่ใช้พารามิเตอร์แบบกระจาย	77
5.8	ชุดของข้อมูลอินพุตของพารามิเตอร์แบบไม่เชิงเส้น	78
5.9	ชุดของข้อมูลอินพุตของสวิตช์	78
5.10	ชุดของข้อมูลอินพุตของแหล่งกำเนิดแรงดัน	79
5.11-5.12	การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งทางเทอร์มินัล	82
5.13	การป้อนข้อมูลสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งผ่านทางไฟล์อินพุต...	84
5.14-5.20	แสดงผลลัพธ์ของการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง	85
5.21	แสดงข้อมูลอินพุตของการวิเคราะห์ Step Response ของแรงดันอิมพัลส์..	94
5.22	แสดงข้อมูลอินพุตของการวิเคราะห์เกี่ยวกับ Lightning Surge	97
6.1	แสดงจำนวนสูงสุดของข้อมูลที่ใช้งานได้	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 และ โหนด m	11
2.2 ข	วงจรสมมูลย์อิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ไม่มีกำลังสูญเสีย	12
2.2 ค	แสดงตำแหน่งการต่อความต้านทานในการแทนสายส่ง	12
2.3	วงจรสมมูลย์ชนิดพายของสายส่ง	13
2.4	การทรานส์ฟอร์มสายส่ง 3 เฟสจากเฟสโตเมนเป็น Modal โตเมน ...	15
2.5	แสดงสัญลักษณ์ตำแหน่งของสายส่งไฟฟ้า	18
2.6	โพลีชาร์ตของโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่ง	23
2.7 ก	อินดักแตนซ์ L ต่อระหว่างโหนด k และ m	24
2.7 ข	วงจรสมมูลย์สำหรับอินดักแตนซ์โดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน	25
2.7 ค	คาแปซิแตนซ์ C ต่อระหว่างโหนด k และ m	25
2.7 ง	วงจรสมมูลย์สำหรับคาแปซิแตนซ์โดยใช้พารามิเตอร์แบบก้อน	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	วิธีการชดเชยแสดงในลักษณะวงจรสมมูลย์เทพวณิน	42
3.11	โพลีชาร์ตของโปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า	48
4.1	โพลีชาร์ตแสดงโครงสร้างของโปรแกรม	56

รูปที่	ท หน้า
4.2	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการอ่านข้อมูลอินพุท 57
4.3	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการจัด Topology ของข้อมูล... 58
4.4	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการจัดลำดับ เลขของโหนดต่าง ๆ. 59
4.5	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในหน่วย เดียวกัน 60
4.6	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยสำหรับสร้างตารางบันทึกข้อมูลชนิด ต่าง ๆ 61
4.7	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการสร้างปลั๊กแอดมิตแตนซ์ เมตริกซ์ 62
4.8	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น 63
4.9	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการคำนวณหารานเขียนต์แม่เหล็ก ไฟฟ้า 64
4.10	โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อยในการคำนวณหารานเขียนต์แม่เหล็ก ไฟฟ้า (ต่อ) 65
4.11	แสดงถึงวงจรทรานเซียนต์ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ 66
4.12	แสดงถึงวงจรทรานเซียนต์ขณะปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ 66
4.13	แสดงถึงวงจรทรานเซียนต์ขณะสับคาแปซิเตอร์ 67
4.14	แสดงถึงวงจรสมมูลย์ในการเกิดเฟอรัโรเรโซแนนซ์ 68
4.15	แสดงถึงวงจรในการศึกษาทรานเซียนต์เนื่องจากฟ้าผ่า 69
5.1	แสดงรูปร่างลักษณะของเสาไฟฟ้า 500 kV 80
5.2	แสดงการวางตำแหน่งสายไฟฟ้าในเฟสเดียวกัน 81
5.3	วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์ 92
5.4	ผลลัพธ์ของแรงดันที่ปลั๊ก 3 93
5.5	ตัวอย่างของ Lightning Discharge 95
5.6 ก	แสดงผลของแรงดันที่ชั่วของหม้อแปลง 97
5.6 ข	แสดงกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่า 97