

การควบคุมความแม่นยำของการจำลองเชิงเวลาของวงจรสายส่งโดยการประมาณค่าการกระจาย
แรงดันและกระแสในสายด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลังแบบแบ่งท่อน

นายภาณุวัฒน์ ต่านกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ACCURACY CONTROL OF TRANSIENT SIMULATION OF A TRANSMISSION LINE
CIRCUIT BY APPROXIMATING ITS VOLTAGE AND CURRENT DISTRIBUTIONS
WITH PIECEWISE EXPONENTIAL FUNCTIONS

Mr. Panuwat Dan-klang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511880

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมความแม่นยำของการจำลองเชิงเวลาของวงจร
สายส่งโดยการประมาณค่าการกระจายแรงดันและกระแส
ในสายด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลังแบบแบ่งท่อน

โดย

นาย ภาณุวัฒน์ ต่านกลาง

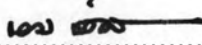
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

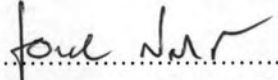
รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัมย์

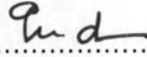
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

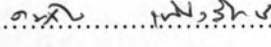

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงศ์)

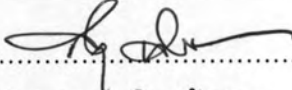
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัมย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัตน์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สุเทพ นิคมคล้าย)

ภาณุวัฒน์ ด่านกลาง : การควบคุมความแม่นยำของการจำลองเชิงเวลาของวงจรสายส่ง โดยการประมาณค่าการกระจายแรงดันและกระแสในสายด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลังแบบแบ่งท่อน. (Accuracy Control of Transient Simulation of A Transmission Line Circuit by Approximating its Voltage and Current Distributions with Piecewise Exponential Functions) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัมย์, 101 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีใหม่ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของวงจรไฟฟ้าที่มีสายส่ง วิธีการที่นำเสนอไม่เพียงได้ผลวิเคราะห์ที่ปลายสายส่งเท่านั้นแต่รวมถึงการกระจายของแรงดันในสายส่ง โดยใช้การกระจายของแรงดันและกระแสเป็นตัวแปรตามวิธี Distribution State Variable (DSV) ที่นำเสนอ สมการคุณลักษณะของสายส่งที่เป็นอนุพันธ์ย่อยของเวลาและระยะทางจะถูกเปลี่ยนเป็นสมการอนุพันธ์สามัญขึ้นกับเวลา ซึ่งมีลักษณะเหมือนอุปกรณ์ทั่วไปเช่นตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำ โดยแบบจำลองเชิงเวลาของสายส่งถูกสร้างด้วยการแบ่งเวลาเป็นช่วงสั้นตามวิธี Backward Differentiation Formulae และความแม่นยำของผลวิเคราะห์วัดค่าความผิดพลาดจากการตัดปลาย ซึ่งนำไปใช้ควบคุมขนาดของขั้นเวลา อย่างไรก็ตามความซับซ้อนของการกระจายของแรงดันและกระแสเพิ่มขึ้นตามเวลา งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีใช้ฟังก์ชันเลขชี้กำลังแบ่งท่อนประมาณค่าการกระจายของแรงดันและกระแส อีกทั้งเสนอวิธีแบ่งครึ่งท่อนเพื่อจัดการจำนวนท่อนย่อยให้เปลี่ยนแปลงอย่างเหมาะสม และควบคุมความผิดพลาดของการประมาณให้น้อยกว่าสัดส่วนของค่าความผิดพลาดจากการตัดปลายโดยอัตโนมัติ โดยวิธีการที่นำเสนอนี้ทำให้สามารถแสดงและ เก็บค่าการกระจายของแรงดันและกระแสในสายส่งโดยไม่ต้องเตรียมการแบ่งท่อนไว้ก่อนการวิเคราะห์ ทั้งนี้ได้แสดงผลการทดลอง 5 ตัวอย่างโดยโปรแกรม MATLAB ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับโปรแกรม Hspice ซึ่งเป็นโปรแกรมได้รับการเชื่อถือ นอกจากนั้นยังแสดงการกระจายในสายส่งซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีการที่นำเสนอที่โปรแกรม Hspice ไม่สามารถทำได้ถ้าไม่มีการเตรียมการแบ่งท่อนไว้ล่วงหน้า

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... *ณัฐพงศ์ ด่านกลาง*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *เอกชัย ลีลารัมย์*
 ปีการศึกษา.....2551.....

4871823721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : TRANSMISSION LINE / DISTRIBUTION STATE VARIABLE /
PIECEWISE EXPONENTIAL APPROXIMATION / TRANSIENT SIMULATION

PANUWAT DAN-KLANG : ACCURACY CONTROL OF TRANSIENT
SIMULATION OF A TRANSMISSION LINE CIRCUIT BY APPROXIMATING ITS
VOLTAGE AND CURRENT DISTRIBUTIONS WITH PIECEWISE
EXPONENTIAL FUNCTIONS. ADVISOR : ASSOC. PROF. EKACHAI
LEELARASMEE, Ph.D., 101 pp.

This research proposes a new method for transient simulation of transmission lines circuit. This method not only gives the time domain solution of the line terminal voltage and current, but also their distributions within the lines. The method achieves its goal by treating the distributions as Distributed State Variables (DSV) and transforms the transmission lines equation into an ordinary differential equation. This allows the lines to be treated as a single component that behaves like other lumped dynamic components. Using Backward Differentiation Formulae for time discretization, the line is converted to a time domain companion model, from which its local truncation error for time step control can be derived. As the voltage and current distributions get more complicated with time, a new piecewise exponential approximation with controllable accuracy is invented. A segmentation algorithm is also devised so that the line is dynamically bisected to guarantee that the total approximation error is a small fraction of the local truncation error. Using this approach, the user can see the line voltage and current at any point and time freely without explicitly segment the line a priori before starting the simulation. The MATLAB is used to test 5 examples which show good agreement with Hspice.

Department : Electrical Engineering Student's Signature *panuwat dan-klang*
Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature *Assoc. Prof. Ekachai Leelarasamee*
Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนการวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความรู้และประสบการณ์ดีๆ ทั้งด้านวิชาการ ด้านสังคมและอื่นๆแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา อย่างสูงที่เล็งดูให้การสนับสนุนในด้านการเงินและ กำลังใจ ขอขอบคุณพี่สาว ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ มาตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและประยุกต์วงจรรวมทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำและความรู้ดีๆที่มีให้มาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	5
บทที่ 2 งานวิจัยก่อนหน้า	6
2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของวงจรไฟฟ้า.....	6
2.2 งานวิจัยก่อนหน้า	8
2.2.1 Lumped Segmentation	8
2.2.2 Method of characteristic.....	9
2.2.3 Convolution และ Recursive Convolution technique	13
2.2.4 Numerical Inverse Laplace Transform (NILT)	16
2.2.5 Model Order Reduction (MOR)	18
บทที่ 3 การจำลองผลตอบสนองเชิงเวลาของวงจรที่ประกอบด้วยสายส่ง.....	20
3.1 การสร้างแบบจำลองเชิงเวลาของสายส่งตามวิธี Distribution State Variable (DSV).....	20
3.2 การประมาณการกระจายของแรงดันและกระแสในสายส่งด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลังแบบแบ่งท่อน.....	27
3.3 การสร้างแบบจำลองเชิงเวลาในการใช้งานจริง	36
3.4 การคำนวณค่าแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆในสายส่ง.....	38

3.5	การคำนวณค่าความผิดพลาดการตัดปลาย (Local Truncation Error, LTE)	40
3.6	วิธีอินทิเกรตทางอ้อม	42
3.6.1	วิธีอินทิเกรต $\int_0^1 e^{M_1(1-\tau)} d e^{M_2(\tau)} d\tau$	43
3.6.2	วิธีอินทิเกรต $\int_0^1 e^{M_1(\tau)} d e^{M_2(\tau)} d\tau$	43
3.7	การแก้ปัญหาเมทริกซ์เอกฐาน (Singular)	45
3.8	การประมาณค่าอนุพันธ์ทางเวลาด้วย Backward Differentiation Formula (BDF) อันดับที่ p^{th}	48
3.9	การประมาณค่าการกระจายในสายส่งกรณีประมาณค่าอนุพันธ์ทางเวลาด้วย p^{th} BDF	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....		53
4.1	วงจรสายส่งที่มีความสูญเสีย (Lossy transmission line) หนึ่งเส้น.....	53
4.2	การวิเคราะห์สายส่งที่มีการเชื่อมโยงกัน	58
4.3	การจำลองผลของกระแสพัลส์ในสายส่งที่มีการสูญเสียหนึ่งเส้น.....	62
4.4	การจำลองผลของกระแสพัลส์ในสายส่งที่มีการเชื่อมโยงกัน.....	65
4.5	การเปรียบเทียบผลของ BDF อันดับ 1 และ 2 ต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์....	68
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ		72
5.1	ข้อสรุป.....	72
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....		74
ภาคผนวก.....		76
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....		77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		101

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 ตัวอย่างวงจรไฟฟ้าวงจรหนึ่ง.....	6
รูปที่ 2-2 แบบจำลองทางเวลาของวงจรในรูปที่ 2-1	7
รูปที่ 2-3 สายส่ง $N + 1$ เส้นรวมเส้นอ้างอิง	8
รูปที่ 2-4 การใช้แบบจำลองแบบ Lumped segmentation ในการวิเคราะห์สายส่ง ก) หลักการของวิธี Lumped segmentation ข) คือวงจรก่อนแบบต่างๆ.....	9
รูปที่ 2-5 แบบจำลองที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่งในโดเมนความถี่	10
รูปที่ 2-6 แบบจำลองทางเวลาของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสียตามวิธีของ Branin	11
รูปที่ 2-7 วงจรสมมูลของสายส่งตามวิธี Marti	12
รูปที่ 2-8 วงจรสำหรับแสดงการคำนวณตามวิธี NILT	16
รูปที่ 2-9 หลักการประมาณความนำเข้าของวงจร 1 พอร์ต ด้วยวิธี MOR ที่ $k < n$	18
รูปที่ 3-1 สายส่งสัญญาณสองเส้นรวมเส้นอ้างอิง ($N=1$)	20
รูปที่ 3-2 การกระจายของแรงดันในสายส่งที่เวลาต่างๆกัน.....	21
รูปที่ 3-3 วงจรสมมูลของแบบจำลองทางเวลา.....	23
รูปที่ 3-4 ความสัมพันธ์ของการกระจายของแรงดันในสายส่ง , LTE_n และ h_n ณ เวลา t_n	24
รูปที่ 3-5 แผนภาพการวิเคราะห์วงจรสายส่งตามวิธี DSV.....	26
รูปที่ 3-6 การประมาณการกระจายของแรงดันและกระแสในสายส่งหนึ่งเส้น.....	29
รูปที่ 3-7 แผนภาพการประมาณค่าการกระจายของแรงดันและกระแสในสายส่งโดยวิธี แบ่งครึ่งก่อน	31
รูปที่ 3-8 การรวมท่อนย่อยของสายส่งหนึ่งเส้น	32
รูปที่ 3-9 แผนภาพการประมาณค่าการกระจายของแรงดันและกระแสในสายส่งที่รวมการ รวมท่อนย่อยแล้ว	34
รูปที่ 3-10 ลักษณะของท่อนย่อยในสายส่งที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการประมาณค่าการ กระจาย.....	35
รูปที่ 3-11 การคำนวณแรงดันและกระแสที่ตำแหน่งใดๆ ของสายส่ง.....	39
รูปที่ 3-12 แผนภาพการประมาณการกระจายในสายส่งด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นร่วมกับฟังก์ชัน เลขชี้กำลัง	47
รูปที่ 4-1 วงจรสายส่งที่มีความสูญเสียหนึ่งเส้น.....	53
รูปที่ 4-2 การเปรียบเทียบแรงดัน $v(1,t)$ ระหว่าง Hspice กับ DSV ของวงจรในรูปที่4-1	54

รูปที่ 4-3	การเปรียบเทียบแรงดันแรงดัน $v(0,t)$ ระหว่าง Hspice กับ DSV ของวงจรรูปที่ 4-1	54
รูปที่ 4-4	ค่าความผิดพลาดจากการตัดปลาย (LTE) ที่เวลาต่างๆ ของการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4-1	55
รูปที่ 4-5	การเปลี่ยนแปลงขนาดชั้นเวลาระหว่างการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4-1	55
รูปที่ 4-6	การกระจายของแรงดันในสายส่งที่เวลาต่างๆกัน.....	56
รูปที่ 4-7	เปรียบเทียบแรงดัน $v(0,t)$ ที่ค่า LTE_{max} และ h_{max} แตกต่างกัน.....	56
รูปที่ 4-8	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงชั้นเวลาที่ค่า LTE_{max} และ h_{max} แตกต่างกัน	57
รูปที่ 4-9	เปรียบเทียบจำนวนท่อนย่อยที่ค่า LTE_{max} และ h_{max} แตกต่างกัน.....	58
รูปที่ 4-10	วงจรสายส่งสองเส้นที่มีการเชื่อมโยงกัน.....	59
รูปที่ 4-11	ผลวิเคราะห์แรงดัน $v_1(1,t)$ ด้วยวิธี DSV ที่เงื่อนไขต่างๆ เปรียบเทียบกับโปรแกรม Hspice.....	60
รูปที่ 4-12	ผลเปรียบเทียบแรงดันกระพือมของเส้นที่ 1 ระหว่างวิธี DSV กับโปรแกรม Hspice ที่ช่วงเวลา 5.5nsec ถึง 8.5nsec	60
รูปที่ 4-13	ผลวิเคราะห์แรงดัน $v_2(1,t)$ ด้วยวิธี DSV ที่เงื่อนไขต่างๆ เปรียบเทียบกับโปรแกรม Hspice.....	61
รูปที่ 4-14	ผลเปรียบเทียบแรงดันกระพือมของเส้นที่ 2 ระหว่างวิธี DSV กับโปรแกรม Hspice ที่ช่วงเวลา 5.5nsec ถึง 9nsec	61
รูปที่ 4-15	การเปลี่ยนแปลงจำนวนท่อนย่อยกรณีกำหนด $LTE_{max} = 0.005$ และ $h_{max} = 1 \times 10^{-7}$	62
รูปที่ 4-16	วงจรสายส่งมีความสูญเสียหนึ่งเส้นโดยใส่กระแสพัลส์เข้าที่ตำแหน่ง $x = 0.7$	63
รูปที่ 4-17	การกระจายของแรงดันของสายส่งของวงจรในรูปที่ 4-16 ในช่วงเวลา 0 – 2msec เมื่อยังไม่มีกระแสพัลส์.....	63
รูปที่ 4-18	การเปลี่ยนแปลงจำนวนท่อนย่อยในช่วงที่สัญญาณเข้าเป็นไซน์	63
รูปที่ 4-19	การเคลื่อนที่ของพัลส์ในสายส่งระหว่างเวลา 4.1msec ถึง 4.2msec	64
รูปที่ 4-20	การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ตำแหน่ง $x = 0$, $x = 0.7$ และ $x = 1$	64
รูปที่ 4-21	วงจรสายส่งที่มีความเชื่อมโยงกันสามเส้นโดยใส่พัลส์เข้าที่สายส่งเส้นที่หนึ่ง.....	65
รูปที่ 4-22	แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆในสายส่งเส้นที่ 1 ของวงจรในรูปที่ 4-21.....	66
รูปที่ 4-23	แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆในสายส่งเส้นที่ 3 ของวงจรในรูปที่ 4-21	66

รูปที่ 4-24 การกระจายของแรงดันในสายส่งเส้นที่ 1 ระหว่างเวลา 0 ถึง 4 nsec ของวงจรในรูปที่ 4-21	67
รูปที่ 4-25 A การกระจายของแรงดันในสายส่งเส้นที่ 3 ระหว่างเวลา 0 ถึง 4 nsec ของวงจรในรูปที่ 4-21	67
รูปที่ 4-26 แรงดัน $v(1,t)$ เปรียบเทียบระหว่าง BDF อันดับที่ 1 และ 2 กับ Hspice	68
รูปที่ 4-27 เปรียบเทียบผลการกระเพื่อมของแรงดัน $v(1,t)$ ที่ชั้นเวลาต่างๆกัน	69
รูปที่ 4-28 การเปลี่ยนแปลงแรงดัน $v_2(1,t)$ เปรียบเทียบระหว่าง BDF อันดับที่ 1 และ BDF อันดับที่ 2 ในช่วงเวลา 5.5 nsec ถึง 10 nsec	69
รูปที่ 4-29 ภาพขยายแรงดันกระเพื่อมที่เกิดขึ้นกับ BDF อันดับที่ 2 ในช่วงเวลา 2 nsec ถึง 4.5 nsec	70

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4-1 ตารางเปรียบเทียบผลการปรับค่า LTE_{max} และ h_{max} ของวงจรในรูปที่4-1.....	58
ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบผลการปรับค่า LTE_{max} และ h_{max} ของกรณีสายส่งสองเส้น	62