การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการป้องกัน

A STUDY AND ANALYSIS OF LIGHTNING EFFECTS ON PV AND PROTECTION

ณัฐดนัย ทองชมภู

NATDANAI THONGCHOMPOO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการป้องกัน

ณัฐดนัย ทองชมภู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553

A STUDY AND ANALYSIS OF LIGHTNING EFFECTS ON PV AND PROTECTION

NATDANAI THONGCHOMPOO

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR

THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายณัฐดนัย ทองชมภู

COPYRIGHT © 2010 ลิขสิทธิ์ พ.ศ 2553
FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการป้องกัน A STUDY AND ANALYSIS OF LIGHTNING EFFECTS ON PV AND PROTECTION
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐดนัย ทองชมภู
รหัสประจำตัว	114960402006-9
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง
วัน เดือน ปี ที่สอบ	24 เมษายน 2553
สถานที่สอบ	ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร.อุเทน คำน่าน)

..... กรรมการ

(ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์)

..... กรรมการ

(ดร.สุรินทร์ แหงมงาม)

..... กรรมการ

(ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการป้องกัน
นักศึกษา	นายณัฐดนัย ทองชมภู
รหัสประจำตัว	114960402006-9
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
ปีการศึกษา	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จัดทำเพื่อการศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า โดยจำลองการเกิดฟ้าผ่าจากการใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยการนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาทดสอบร่วมกับสมการรูปคลื่นฟ้าผ่า ซึ่งเป็นสมการอิมพัลส์ เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้น

หลังจากที่ทำการจำลองระบบทั้งสองแล้ว ก็มีการออกแบบอุปกรณ์ในการทดสอบ โดยมีการควบคุมในส่วนของปริมาณแสง ระยะห่างในการทดสอบ รวมถึงการตรวจวัด โดยใช้กรงฟาราเดย์ป้องกันผลกระทบจากค่าของสนามแม่เหล็ก เบื้องต้นพบว่าสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีสัญญาณอิมพัลส์ฟ้าผ่าเกิดขึ้น มีระดับแรงดันที่สูงขึ้น ซึ่งส่วนหนึ่งเนื่องมาจากแสงจากการเกิดเบรกดาวน์ของฟ้าผ่าและอีกส่วนหนึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากสัญญาณอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำนี้อาจทำความเสียหายกับเซลล์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ ในระบบได้

การลดผลกระทบที่เกิดขึ้น จากการทดสอบระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดการเบรกดาวน์ มีผลต่อระดับแรงดันที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นลดน้อยลงด้วย จากการศึกษายังพบอีกว่า มีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ หาวิธีการลดทอนหรือป้องกันในการศึกษาขั้นตอนต่อไปได้ ซึ่งโดยปกติแล้วในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ต้องอยู่ในโซนป้องกันและอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ส่วนของเอาท์พุทเพื่อป้องกันค่าสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น

คำสำคัญ : ผลกระทบของการเกิดฟ้าผ่า, คุณสมบัติของผลิตไฟฟ้าจากเซลแสงอาทิตย์, ระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลแสงอาทิตย์.ระบบป้องกันการเกิดฟ้าผ่า

Thesis Title :	A STUDY AND ANALYSIS OF LIGHTNING ON PV AND PROTECTION
Student Name :	Mr. Natdanai Thongchompoo
Student ID :	114960402006-9
Degree Award :	Master of Engineering
Study Program :	Electrical Engineering
	Electrical Power
Academic Year :	2009
Thesis Advisor :	Dr. Boonyang Plangklang

ABSTRACT

This thesis presents a study of the effects on photovoltaic by lightning impulse voltage. For the analysis, we use the program Matlab/Simulink to simulate a photovoltaic math model and lightning impulse model in order to study the characteristic of the lightning effect before the real implementation.

After the simulation, the experiment is set up accordingly to standards. In the experiment, we adjust both the level of lightning impulse voltage and distance between PV module and lightning area to measure the real output from PV module. After the test, the output voltage of photovoltaic has the lightning impulse signal combining together with PV output. The flashing light of lightning also has an effect to the output voltage of photovoltaic but it is small signal. The main effect is from the magnetic field intensity. It occurs from lightning impulse current. The magnetic field intensity is a main factor to induce voltage on output of photovoltaic. This induce voltage can be damage to PV cell, converter, and other equipments in the PV system.

From the study, the results indicate that the level of induced voltage will depends on the distance between PV module and lighting area. The level of impulse voltage is also considered as the factor of induce voltage. Therefore to reduce this effect, The PV system must have a protecting zone from lightning impulse and also must have lightning protection device at the output of PV to protect the induced voltage from magnetic field.

Keywords : Lightning Impulse voltage, PV system, Lightning protection System

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการดำเนินการออกแบบและวิจัย การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการป้องกัน รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยและการทดสอบรวมถึง คำแนะนำเพิ่มเติม จนสำเร็จไปได้อย่างลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศกรรมศาสตร์ ทุกท่าน ขอขอบคุณหัวหน้า และเพื่อนร่วมงาน บริษัท เจวีซีแมนูแฟคเจอริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด และพนักงานที่การประปาส่วนภูมิภาค เขต 4 จังหวัดสุราษฎร์ธานี ทุกท่านที่ให้โอกาสและสนับสนุนการศึกษาต่อปริญญาโทในครั้งนี้ และให้ความอนุเคราะห์ด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามีความพยายาม มุมานะในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ข้าพเจ้ารู้สึกถึงความกรุณาของทุกๆ ท่านเหล่านี้เป็นอย่างยิ่งที่มีความกรุณาด้วยดีเสมอมา จึงขอประกาศขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ณัฐดนัย ทองชมภู

24 เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทความเบื้องต้นในการศึกษาวิจัย	4
2.2 พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.3 การผลิตพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์	14
2.4 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	16
2.5 คุณสมบัติที่สำคัญที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.6 การสร้างแรงดันฟ้าผ่า	18
2.7 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง	21
2.8 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	21
2.9 มาตรฐานการติดตั้ง ระบบป้องกันฟ้าผ่า	22
2.10 ย่านการป้องกันฟ้าผ่า	24
2.11 อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ	25
2.12 อุปกรณ์ป้องกันเสิรจ์ทางสายตัวนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ	25
2.13 การเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ	26
2.14 การต่อประสาน Bonding	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15 การกำบัง	27
2.16 การต่อลงดิน	28
2.17 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเกิดวาบฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียง	28
2.18 สรุป	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.1 จำลองคุณลักษณะของแผงเซลแสงอาทิตย์และการสร้างแรงดันฟ้าผ่า	31
3.2 ออกแบบสร้างแรงดันฟ้าผ่า	39
3.3 ออกแบบการวัดและเครื่องมือวัด	39
3.4 สร้างและติดตั้งวงจรการทดลองและทดสอบ	43
3.5 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองและทดลองเปลี่ยนปัจจัยตามผลการออกแบบ	45
3.7 ศึกษาและทดลองหาวิธีการป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสม	45
3.8 ทดสอบและปรับปรุงวิธีการป้องกันฟ้าผ่า	45
3.9 สรุป	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง	46
4.1 บทนำ	46
4.2 ผลทดสอบจากการจำลอง	46
4.3 ผลการทดสอบจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	48
4.4 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบ	54
4.5 สรุป	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	61
5.1 สรุปผลการทดลอง	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก ก โมเดลการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์	65
ภาคผนวก ข มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า	72
ภาคผนวก ค การเกิดฟ้าผ่าและการป้องกัน	80
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่	89
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์	19
2.2 ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากระยะห่างที่แตกต่างกัน	29

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปคตรัมของแสงกับการผลิตพลังงานไฟฟ้า	14
2.2 ระบบการผลิตแบบอิสระ	16
2.3 ระบบการผลิตแบบต่อกับระบบจำหน่าย	17
2.4 ระบบการผลิตแบบผสมผสาน	17
2.5 วงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ A และ B ตามลำดับ	19
2.6 ชุดวัดแรงดันฟ้าผ่าและการติดตั้งภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	21
2.7 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	22
2.8 การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	23
2.9 การแบ่งโซนการป้องกันแรงดันเกินจากฟ้าผ่า	24
2.10 กระแสฟ้าผ่าที่กระจายไปตามระบบ	26
2.11 การแบ่งโซนการป้องกันแรงดันเกินจากฟ้าผ่า	28
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	30
3.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	31
3.3 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์	33
3.4 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ พิจารณา Bypass Diode	34
3.5 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์	34
3.6 Editor Program	35
3.7 ผลจากการ Simulation แรงดันและกำลังของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์	36
3.8 คุณลักษณะแผงเซลล์แสงอาทิตย์	36
3.9 Block Dirgramme ของสมการฟ้าผ่า	37
3.10 กำหนดค่า พารามิเตอร์ของสมการอิมพัลส์ฟ้าผ่า	37
3.11 ผลจากการจำลองระบบอิมพัลส์ ฟ้าผ่า	38
3.12 แบบจำลองการรวมระบบแผงเซลลแสงอาทิตย์กับอิมพัลส์ฟ้าผ่า	38
3.13 ชุดสร้างแรงดันฟ้าผ่า 100 kV - 800 kV	39
3.14 วงจรการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์	40
3.15 ชุดล่อฟ้า	40
3.16 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	41
3.17 ออสซิลโลสโคบและมัลติมิเตอร์สำหรับการวัดแรงดันเอาท์พุทตรง	41
3.18 ออสซิลโลสโคบสำหรับการวัดรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 แผงโซลาร์เซลที่ใช้ในการทดสอบ ขนาด 80 W	42
3.20 รูปคลื่นอิมพัลส์ที่ได้จากการสร้างในห้องทดลอง ขนาด 194 V และขนาด 200 V	43
3.21 การวางระยะที่ห่างจากจุดที่ฟ้าลงระยะที่ 5 m	43
3.22 การเชื่อมต่อกับระบบกราวด์	44
3.23 การใช้เรซินป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	44
3.24 การติดตั้งอุปกรณ์มีการควบคุมปริมาณแสงที่เปลี่ยนแปลงไป	45
4.1 การรวมระบบ PV เข้ากับรูปคลื่นฟ้าผ่า	46
4.2 ค่าพารามิเตอร์ ของอิมพัลส์ฟ้าผ่า	47
4.3 ผลจากการจำลอง	47
4.4 จ่ายรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ขนาดแรงดัน 150 kV	48
4.5 จ่ายรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ขนาดแรงดัน 200 kV	49
4.6 รูปคลื่นเอาท์พุทที่วัดได้จากสโคปในขณะที่วัดได้ 7 V ก่อนการจ่ายสัญญาณ อิมพัลส์	49
4.7 รูปคลื่นเอาท์พุทที่วัดได้จากสโคปในขณะที่วัดได้ 7 V หลังการจ่ายสัญญาณอิมพัลส์	50
4.8 โมเดลคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	50
4.9 การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในตู้เหล็กและการใช้ Probe ในการตรวจวัดสัญญาณ	51
4.10 แรงดันเอาท์พุทก่อนการป้องกัน	51
4.11 แรงดันเอาท์พุท จากการทดสอบในตู้เหล็ก	52
4.12 แรงดันเอาท์พุท จากการทดสอบที่ระดับแรงดัน 200 kV	52
4.13 แรงดันเอาท์พุท จากการทดสอบที่ระดับแรงดัน 400 kV	53
4.14 แรงดันเอาท์พุท จากการทดสอบที่ระยะ 3 เมตร	53
4.15 แรงดันเอาท์พุท จากการทดสอบที่ระยะ 5 เมตร	54
4.16 แรงดันเอาท์พุท จากการทดสอบที่ระยะ 8 เมตร	54
4.17 (ก) แรงดันเอาท์พุทของโซลาร์เซลเมื่อทดสอบกับสัญญาณอิมพัลส์ 200 kV	55
4.17 (ข) ภาพแรงดันเอาท์พุทของโซลาร์เซลเมื่อทดสอบกับสัญญาณอิมพัลส์ 400 kV	55
4.18 ทดสอบวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก่อนต่อ แผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าระบบ	56
4.19 ระดับแรงดันที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้ที่ 400 Vp	57
4.20 จำลองการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ จากสนามแม่เหล็ก	57
4.21 วงจรไฟฟ้าจำลองการเกิดสัญญาณรบกวน	58
4.22 ผลจากการจำลองระบบที่มีสนามแม่เหล็ก	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 แรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการทดสอบ	59
4.24 วงจรจำลองเมื่อมีสัญญาณรบกวน	60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	ค่า Ideality Factor
b	ความกว้างของวงรอบป้องกัน
Cs	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
Cb	ตัวเก็บประจุโหลด
Ga	ค่าความเข้มแสง
Gas	ค่าความเข้มแสงมาตรฐาน 1000 W/m^2
H_0	ค่าสนามแม่เหล็กในย่านป้องกันฟ้าผ่า 0 หน่วยเป็นแอมป์ต่อเมตร
i_0	กระแสฟ้าผ่าในย่านป้องกันฟ้าผ่า 0 หน่วยเป็นแอมแปร์
Iph	ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต้
Isat	ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงและอุณหภูมิ
Iscs	ค่ากระแสลัดวงจรภายใต้สภาวะมาตรฐาน
ku	ค่าคงที่ 1.0203549
l	ความยาวของวงรอบป้องกัน
q	ขนาดประจุมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ k คือ ค่าคงที่ Boltzman มีค่า 1.38×10^{-23} J/K
Rd	ความต้านทานปรับหน้าคลื่น
RL	ความต้านทานกำจัดกระแสอัดประจุ
S	สปาร์กแกป
S_a	ระยะห่างจุดวาบฟ้าผ่ากับถึงจุดที่กระทบ
T	อุณหภูมิสมบูรณ์
Ts	ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน 298 K
Ug	ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง
Uo	แรงดันอัดประจุ
U_0	แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นหน่วยเป็น โวลต์
$U(t)$	แรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้น
V_{ocs}	ค่าแรงดันเปิดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน
Vt	Thermal Voltage
$\tau 1$	เวลาช่วงหน้าคลื่น

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\tau 1$	เวลาช่วงห่างคลื่น
ΔI_{sc}	ค่ากระแสลัดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ
ΔV_{oc}	ค่าแรงดันเปิดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ