

การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์
แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ
Design and Construction of a 150 kV Capacitive Voltage Divider
for High Voltage AC Measurement

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ขนาดพิกัด 150 กิโลโวลต์ สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับ อัตราส่วนแรงดัน 1000:1 โดยองค์ประกอบหลักแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ภาคแรงสูงใช้ตัวเก็บประจูงยชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์มต่ออันดับกันมีค่าความจุไฟฟ้ารวม 43.321 พิกโคฟารัด ภาคแรงต่ำใช้ตัวเก็บประจูงยชนิดเดียวกับภาคแรงสูงต่อผสมมีค่าความจุไฟฟ้ารวม 43.277 นาโนฟารัด ทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่อฉนวนอะคริลิก การออกแบบและทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) และ IEEE Std.4 (1995) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนด โดยที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 1\%$

คำสำคัญ: โวลเตจดีไวเดอร์

Abstract

This paper presents the design and construction of a capacitive voltage divider. The measurement is 150 kV for alternating voltage and a voltage ratio of 1000:1. The divider consists of two main parts: The first part is the high voltage, made from a series of capacitors polypropylene film type and the capacity is 43.321 pF. The low voltage is made of a series-parallel capacitors, the same as for the high voltage. The capacity is 43.277 nF. They are placed in an acrylic tube. The test and design are referred to as IEC 60060-2 (1994) and IEEE Std.4 (1995). The test results show that the capacitive voltage divider characteristics, according to standard specifications; the accuracy of linearity is about $\pm 1\%$.

Keywords: voltage divider, AC measurement

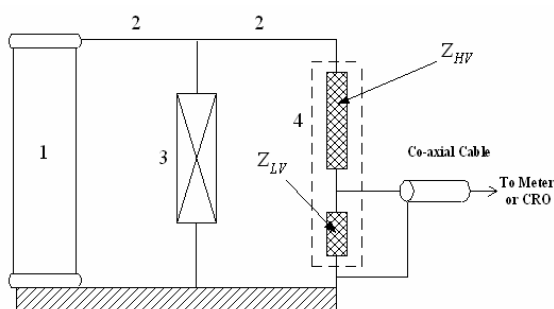
1. บทนำ

ในการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องใช้โวลเตจดีไวเดอร์เพื่อการศึกษาในภาคปฏิบัติและใช้ในงานวิจัยต่างๆ รวมถึงภาคอุตสาหกรรมต้องใช้โวลเตจดีไวเดอร์ในการทดสอบคุณภาพสินค้า โดยปัจจุบันโวลเตจดีไวเดอร์แรงดันสูงต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศด้วยราคาที่แพง ดังนั้นจึงมีความคิดริเริ่มพัฒนาขึ้นมาใช้เอง เพื่อลดการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ และเพื่อเป็นการรองรับการวิจัยพัฒนาในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่จะมีเพิ่มขึ้นในมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซียต่อไปในอนาคต อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้ความสามารถเพิ่มมากขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

ระบบการวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ (สำรวย สังข์สะอาด, 2549) โดยทั่วไปแสดงได้ดังภาพ 1



ภาพ 1 การวัดแรงดันสูงกระแสสลับด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

ที่มา. จาก “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,” โดยสำรวย สังข์สะอาด, 2549, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โดยที่

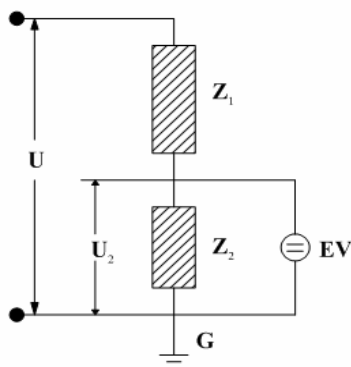
- 1 คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ
- 2 คือ สายตัวนำแรงสูง
- 3 คือ อุปกรณ์ทดสอบ
- 4 คือ โวลเตจดีไวเดอร์สำหรับใช้วัดแรงดัน - ทดสอบ

Z_{HV} คือ องค์กรประกอบภาคแรงดันสูงของ - โวลเตจดีไวเดอร์

Z_{LV} คือ องค์กรประกอบภาคแรงดันต่ำของ - โวลเตจดีไวเดอร์

2.2 หลักการโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันสูง ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำเพื่อที่จะสามารถใช้โวลต์มิเตอร์ หรือ เครื่องวัดแรงดันต่ำๆ วัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงต่ำที่นำมาต่อเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นคือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสูงมากๆ เช่น อิเล็ก-โทรสแตติกส์โวลต์มิเตอร์ กล่าวคืออิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ (สำรวย สังข์สะอาด, 2549) ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 องค์ประกอบโวลเตจดีไวเดอร์
ที่มา. จาก “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,” โดย
สำราญ สังข์สะอาด, 2549, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- โดยที่ Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูง
- Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ
- U คือ แรงดันที่ต้องการวัด
- U_2 คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด
- EV คือ เครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทาง-
ขาเข้าสู่

3. การออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์

ขนาด 150 kV

3.1 คุณสมบัติที่กำหนด

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์
ที่ต้องการออกแบบและสร้างเป็นโวลเตจดีไว-
เดอร์แบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้วัดแรงดันสูง
กระแสสลับ การออกแบบและการทดสอบจะ
อ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐาน (IEEE. 1995, IEC.
1989, IEC. 1994) กำหนดคุณสมบัติโวลเตจดีไว-
เดอร์ขนาด 150 kV ที่ต้องการออกแบบสร้าง
แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1

พิกัดของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
1. Rated Voltage	150 kV _{rms}
2. Frequency	50 Hz
3. Ratio	1000:1
4. Accuracy	±1%

3.2 การออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ ขนาดพิกัด 150 kV

3.2.1 โครงสร้างและการคำนวณของภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจួយ่อยที่ใช้ มีค่า $0.012 \mu F$,
 $650 V_{ac}$ ออกแบบให้พิกัดแรงดันใช้งาน
โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีค่า 150 kV
ออกแบบเพื่อ 120 % ของพิกัดแรงดันใช้งาน
(E. Kuffel and M. Abdullah, 1981) จะได้ค่า
แรงดันในการออกแบบเป็น 180 kV กำหนดหา
จำนวนตัวเก็บประจួយ่อย และค่ากะแปซิแตนซ์
ของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันของภาคแรงสูง
ดังนี้

จำนวนตัวเก็บประจួយ่อยภาคแรงสูง

$$N = \frac{180 \times 10^3 V}{650 V} = 277 \text{ ตัว}$$

Capacitance ภาคแรงสูง

$$C_1 = \frac{0.012 \times 10^{-6} F}{277} = 43.321 pF$$

3.2.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนแรงดันที่กำหนด 1000:1
ดังนั้นจะได้แรงดันขาออกด้านแรงต่ำที่พิกัดเป็น
150 โวลต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสามารถใช้
กับเครื่องมือวัดด้านแรงต่ำทั่วไปได้ ดังนั้น จึง

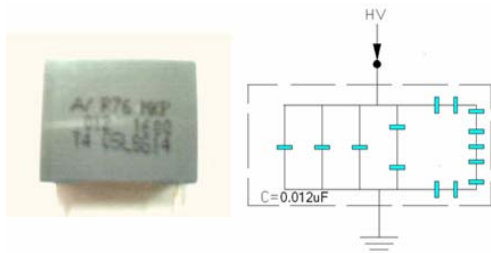
คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำเป็นดังการ
คำนวณต่อไปนี้

พิกัดCapacitance ภาคแรงต่ำ

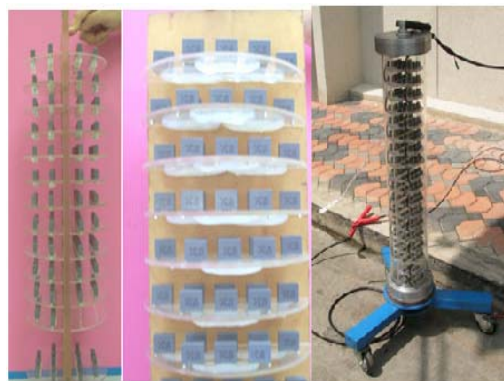
$$C_2 = \left(\frac{U}{U_2} \times C_1 \right) - C_1$$

$$C_2 = (1000 \times 43.321 pF) - 43.321 pF = 43.277 nF$$

โดยใช้ตัวเก็บประจួយ่อยขนาด 0.012 μF ,
650 V_{ac} จำนวน 14 ตัวต่อผสม ได้ค่าความเก็บ
ประจุภาคแรงต่ำรวมเป็น 43.33 nF ลักษณะการ
จัดวางองค์ประกอบตัวเก็บประจួយ่อย แสดงดัง
ภาพ 3 และ โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 150 kV แสดง
ดังภาพ 4



ภาพ 3 ตัวเก็บประจួយ่อยและวงจรตัวเก็บประจุ
ภาคแรงต่ำ



ภาพ 4 โครงสร้างโวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 150 kV

4. การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบ อ้างอิงตามเกณฑ์
มาตรฐาน (IEC. 1989, IEC. 1994) ทำการ
ทดสอบที่ศูนย์ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การ
ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (การไฟฟ้าบาง
พลี) หัวข้อทดสอบดังนี้

1. การวัดความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ (IEC. 1994)
2. การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์
(IEC. 1994)
3. การทดสอบ AC Withstand Voltage
Test (IEC. 1989, IEC. 1994)
4. การทดสอบหาความเป็นเชิงเส้น
(Linearity Test) (IEC. 1994)
5. การทดสอบ Stability Test (IEC.
1994)

4.1 การวัดความจุไฟฟ้า

การวัดค่าความจุไฟฟ้าจะวัดทั้งตัวเก็บ
ประจุภาคแรงสูงและแรงต่ำด้วยเทคนิควงจร
Schering Bridge โดยใช้ Primary Test System
รุ่น OMICRON Model CPC 100 ดังภาพ 5



ภาพ 5 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง จะวัดที่แรงดัน 10 kV และความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำใช้แรงดัน 150 V ผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 2

ตาราง 2

ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัด	%Error
C ₁	43.321 pF	42.469 pF	-1.96
C ₂	43.277 nF	44.1911 nF	2.11

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจะแตกต่างจากผลการคำนวณ เนื่องจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในองค์ประกอบที่ใช้

4.2 การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์

การหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดใช้วิธีวัดค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งใช้หลักการทำงานของวงจร Schering Bridge โดยค่าเก็บประจุที่วัดได้แสดงไว้ในตาราง 3

ตาราง 3

ค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัด

องค์ประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์	ค่าเก็บประจุ (ออกแบบ)	ค่าเก็บประจุ (ทดสอบ)
ภาคแรงสูง (C ₁)	43.321 pF	42.469 pF
ภาคแรงต่ำ (C ₂)	43.277 nF	44.191 nF
เคเบิลวัด (C ₀)	-	1.987 nF

จากค่าเก็บประจุในตารางที่ 3 สามารถหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบตัวเก็บประจุได้จากสมการ

$$F_c = \frac{C_2 + C_c}{C_1} + 1$$

$$F_c = \frac{44.191nF + 1.987nF + 42.469pF}{42.469pF} = 108833$$

4.3 การทดสอบ AC Withstand Voltage Test

เพื่อทดสอบว่าองค์ประกอบภาคแรงสูงที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่พิกัดกำหนดได้ และไม่เสียหายทำให้โวลเตจดีไวเดอร์เสียหายเมื่อใช้งานที่พิกัด จึงทำการทดสอบความทนต่อแรงดันสูงกระแสสลับ ความถี่ 50 Hz ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% ของพิกัด (IEC. 1994) นาน 1 นาที โดยใช้หม้อแปลงทดสอบ Hipotronic ขนาดพิกัด 250 kVA , 380/300kV ผลที่ได้แสดงในตาราง 4

ตาราง 4

ผลการทดสอบ AC Withstand Voltage Test

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ	เวลาทดสอบ	Results
1	165 kV _{rms}	60 sec	Withstand
2	165 kV _{rms}	60 sec	Withstand
3	165 kV _{rms}	60 sec	Withstand

4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (linearity test)

เป็นการวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ทดสอบค่าแรงดันที่วัดว่ามีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ ในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ซึ่งในแต่ละค่าของแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน ±1% ของค่าเฉลี่ย ระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น (IEC.

1994) โดยมีการทดสอบเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ทดสอบมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยดังภาพ 6



ภาพ 6 การทดสอบ Linearity Test และ Stability Test

ตาราง 5

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

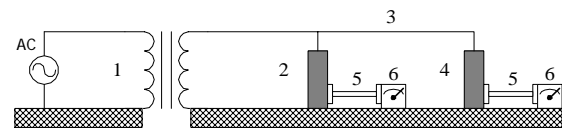
ระบบวัดอ้างอิง U_{ref} (kV _{rms})	ระบบวัดทดสอบ U_C (kV _{rms})	U_{ref} / U_C (kV _{rms})
30.33	26.763	1.123
60.037	53.653	1.118
90.076	80.716	1.115
120.117	107.895	1.113
150.076	135.085	1.110
ค่าเฉลี่ย		1.115
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)		0.005

4.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพ (Stability Test)

เป็นการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุยี่ห้อ High Volt (GERMANY) type MCR 600/500 เพื่อพิจารณาผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีแรงดันผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (IEC. 1994) ค่าที่ได้จากการทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบสร้างขึ้นจะต้องคูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดอ้างอิงด้วย การ

ทดสอบจะต้องทำ 10 ครั้ง โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$

ค่าแรงดันที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% ของพิกัดแรงดันสูงสุด (IEC. 1994) โดยทดสอบที่ระดับแรงดัน 100% ของพิกัดแรงดันสูงสุด คือ 150 kV ดังภาพ 7 ส่วนตารางที่ 6 คือผลจากการทดสอบผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังตาราง 6



ภาพ 7 วงจรการทดสอบความมีเสถียรภาพ

- โดย 1 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
- 2 คือ ระบบวัดอ้างอิง
- 3 คือ สายนำแรงสูง
- 4 คือ โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง
- 5 คือ สายเคเบิลวัด
- 6 คือ เครื่องมือวัดภาคแรงต่ำ

ตาราง 6

ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพที่แรงดัน 150 kV_{rms}

ลำดับ	U_{ref} (kV _{rms})	U_C (kV _{rms})	U_{ref} / U_C
1	150.13	135.47	1.108
2	150.06	135.44	1.107
3	150.02	135.36	1.108
4	150.17	135.48	1.108
5	150.02	135.34	1.108
6	150.02	135.33	1.108
7	150.02	135.33	1.108
8	150.21	135.48	1.108
9	150.18	135.47	1.108
10	150.04	135.23	1.109
ค่าเฉลี่ย	150.087	135.393	1.108
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			0.0004714

ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบที่ระดับแรงดัน 150 kV_{rms} ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0004714 และค่าแรงดันที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้งมีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดอ้างอิงไม่เกิน $\pm 3\%$ ฉะนั้น โวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

5. บทสรุป

โวลเตจดีไวเดอร์แรงดันสูงที่สร้างขึ้นภาคแรงดันสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับ ใช้ตัวเก็บประจุย่อยชนิด Metallized Polypropylene Film ขนาดพิกัด 0.012 μ F, 650 V_{ac} ออกแบบให้ใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ 150 kV โดยมีอัตราส่วนแรงดันประมาณ 1000:1

และมีคุณสมบัติได้ตามที่มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) และ IEEE Std.4 (1995) กำหนด

รายละเอียดข้อมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 kV

Rated Voltage

150 kV

Rated Capacitance, High Voltage C₁

43.321 pF

Rated Capacitance, Low Voltage C₂

43.277 nF

Ratio

1111:1

Accuracy

$\pm 1\%$

เอกสารอ้างอิง

สำรวย สังข์สะอาด. (2549). *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Kuffel, E. & Abdullah, M. (1981). *High-voltage engineering*. Oxford: Pergamon Press.

IEEE Power Engineering Society. (1995). *IEEE Std 4 standard techniques for high-voltage testing*. New York, USA.: [n.p.].

International Electrotechnical Commission. (1989). *IEC standard publication No. 60060-1 high-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements*. Geneva.

International Electrotechnical Commission. (1994). *IEC publication 60060-2 high-voltage test techniques Part 2: Measuring systems*. Geneva.