

การวิเคราะห์แรงดันเกินที่จุดติดตั้งมิเตอร์อ่านหน่วยอัตโนมัติในระบบ 22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค Over Voltage Analysis at the AMR Energy Meter Unit in 22 kV Provincial Electricity Authority System

นิวัฒน์ อินทโชติ จีราวัฒน์ ชัยนุพัทธ์ ณัฐภูมิ โสมเกษมธรินทร์ และ ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 02-549-3520 โทรสาร: 02-549-3422 E-mail: majinbu15@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาปัญหาจากการเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายระดับแรงดันปานกลาง 22 กิโลโวลต์ และการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้มิเตอร์อ่านหน่วยอัตโนมัติ (AMR Energy Meter) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคชำรุดเสียหาย โดยจำลองระบบขณะเกิดฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม EMTP-ATP เพื่อช่วยวิเคราะห์แรงดันที่เกิดขึ้น ณ จุดต่างๆ ที่สนใจ จากการศึกษาพบว่าเส้นทางการไหลของกระแสฟ้าผ่าที่ทำให้มิเตอร์ชำรุดเสียหายจะเกิดจากฟ้าผ่าลงระบบสายดินซึ่งอากาศของเสาต้นที่อยู่ข้างเคียงระบบสายดินแล้วย้อนกลับขึ้นสู่จุดติดตั้งมิเตอร์ผ่านทางหลักดิน และยังสามารถสรุปได้ว่ายิ่งฟ้าผ่าใกล้จุดติดตั้งมิเตอร์หรือขนาดกระแสฟ้าผ่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความรุนแรงจากฟ้าผ่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสาเหตุที่คาดว่าทำให้มิเตอร์ชำรุดเสียหายและไหม้เกิดจากแรงดันจุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์มีค่าสูงกว่าที่ปกติแรงดันกทนของอุปกรณ์ระบายพลังงานฟ้าผ่าของมิเตอร์อยู่ถึง 12.78 กิโลโวลต์ หรือคิดเป็น 3.55 เท่า ที่ระดับกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์

คำสำคัญ: แรงดันเกินฟ้าผ่า มิเตอร์อ่านหน่วยอัตโนมัติ

Abstract

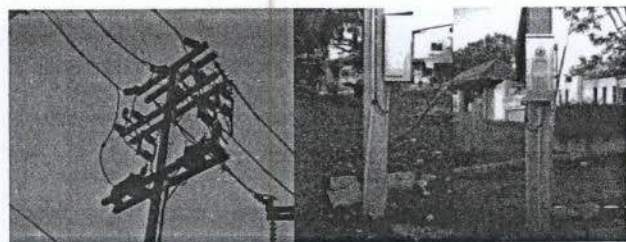
This paper presents a study of lightning over voltage problems in 22 kV medium voltage distribution system and analyzes the damage causes of AMR Energy meter of Provincial Electricity Authority (PEA). EMTP-ATP program is used to determine the overvoltage at the interested positions. As the results of the simulation, it is found that the conducting path of lightning current, which cause of the damage, occurs from the lightning discharge into the Overhead Ground wire (OHGW) at top pole nearby then passes through the grounding system loop back to the AMR Energy meter installation position. Also it can conclude that if the lightning discharge area near the meter installation point or the magnitude of lightning current increase, it will cause more damage to the meter. Thus, it can expect that the defective cause might come from the voltage across grounding point, where the meter is installed, is higher than withstand voltage rating of the varistors in the meter around 12.78 kV or 3.55 times at the lightning current of 40 kA.

Keywords: Lightning Over voltage, AMR Energy meter

1. บทนำ

ปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้นำเทคโนโลยีระบบการอ่านหน่วยการใช้ไฟฟ้าอัตโนมัติเข้ามาใช้งานกับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ที่มีการขอใช้หม้อแปลงเฉพาะราย เป็นมิเตอร์วัดค่าพลังงานไฟฟ้าชนิดอ่านหน่วยอัตโนมัติ (AMR) 3 เฟส 3 สาย ที่มีการขอใช้ไฟประเภทคิดอัตราค่าไฟตามช่วงเวลาการใช้ (Time of Use, TOU) โดยปกติมาตรฐานการติดตั้งมิเตอร์วัดค่าพลังงานไฟฟ้าของ กฟภ. จะทำการติดตั้งไว้ภายนอกอาคาร และมีการต่อลงดินแยกจากระบบป้องกันฟ้าผ่าบนสายส่งซึ่งประกอบด้วยสายดินซึ่งอากาศ (Overhead Ground wire, OHGW) ตัวนำลงดิน (Down Conductor) และระบบสายดิน (Ground Rod System) เพื่อให้สามารถป้องกันความเสียหายจากการเกิดฟ้าผ่า แต่ยังมีมิเตอร์วัดค่าพลังงานไฟฟ้าระบบ AMR บางส่วนชำรุดเสียหาย จากข้อมูลสถิติของศูนย์ควบคุมการอ่านหน่วยอัตโนมัติของ กฟภ. (AMR CENTER) ปี พ.ศ. 2551-2552 มีมิเตอร์ชำรุดที่อาจเสียหายจากฟ้าผ่าจำนวน 169 เครื่อง จากมิเตอร์ชำรุดทั้งหมด 708 เครื่อง หรือคิดเป็นร้อยละ 23.9

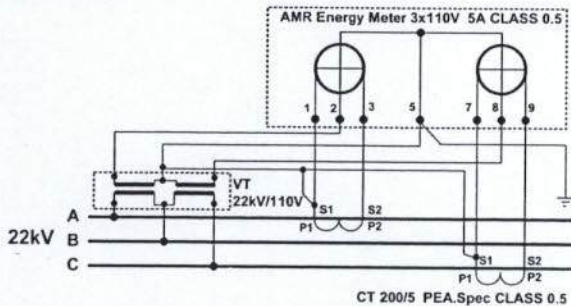
บทความนี้จะกล่าวถึงรูปแบบและการติดตั้งมิเตอร์ของ กฟภ. และสมมติฐานการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้มิเตอร์ชำรุดจากปัญหาแรงดันเกิน ณ จุดติดตั้งมิเตอร์ด้วยแบบจำลองจากโปรแกรม EMTP-ATP วิเคราะห์ค่าแรงดัน ณ จุดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุสาเหตุที่คาดว่าจะทำให้มิเตอร์ชำรุดต่อไป



รูปที่ 1 ลักษณะการติดตั้งมิเตอร์อ่านหน่วยอัตโนมัติ

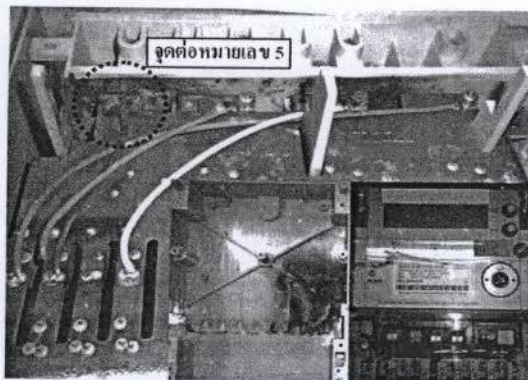
2. การตั้งสมมติฐานและวิเคราะห์สาเหตุของมิเตอร์ชำรุด

สมมติฐานเพื่อการวิเคราะห์เริ่มจากการถอดสำรวจมิเตอร์ที่ชำรุดพบว่าหลายตัวมีร่องรอยการไหม้บริเวณด้านในของจุดต่อร่วมลงดินด้านที่ออกจากหม้อแปลงทดแรงดัน (VT) เช้ามิเตอร์ที่หลังตำแหน่งหมายเลข 5 ดังรูปที่ 2

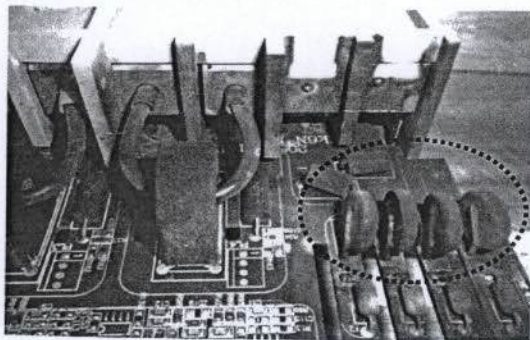


รูปที่ 2 วงจรการต่อมิเตอร์ AMR 3 เฟส 3 สาย ของ กฟภ.

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นทางกายภาพแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเกิดจากระบบการต่อลงดิน แสดงดังรูปที่ 3 เนื่องจากการชำรุดส่วนใหญ่สายคอนโทรลเชื่อมต่อจากหม้อแปลงเครื่องวัดไม่มีการไหม้หรือชำรุดจากแรงดันเกินซึ่งในการวิเคราะห์จะมุ่งเน้นไปในแนวทางจากสาเหตุการเกิดฟ้าผ่าลงสายดินป้องกัน โดยการใช้การจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม EMTP-ATP [1] ในการวิเคราะห์หาแรงดันเกินอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าจำเป็นต้องวิเคราะห์หาเส้นการไหลของกระแสฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันเกิน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ที่ถูกต้องสามารถนำไปสู่แนวทาง และวิธีป้องกันที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 3 มิเตอร์ AMR ที่ชำรุดพบรอยไหม้ด้านในจุดต่อลงดินหมายเลข 5



รูปที่ 4 วาริเตอร์ภายในมิเตอร์ AMR ที่ได้รับความเสียหาย

3. การวิเคราะห์แรงดันเกินอันเนื่องมาจากฟ้าผ่า

การวิเคราะห์หาแรงดันเกินสามารถทำได้โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม EMTP-ATP เพื่อช่วยวิเคราะห์หาแรงดันเกิน ณ ตำแหน่งที่ต้องการ โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อย

3.1 การสร้างแบบจำลอง

การจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราวด้วยโปรแกรม EMTP-ATP จากพารามิเตอร์สายเฟสทั้ง 3 เฟส เป็นชนิด All Aluminium 185 มม² และสายดินซึ่งอากาศมี 1 เส้น ชนิดลวดเหล็กดีเกลียวขนาด 35 มม² โดยใช้โมเดลสายแบบ LCC รวมทั้งอุปกรณ์บนเสา ได้แก่ พารามิเตอร์ถูกด้วย ความต้านทานดินอิมพัลส์ กับดักฟ้าผ่า และหม้อแปลงเครื่องวัดจะใช้ตามมาตรฐานพารามิเตอร์ กฟภ. [3] ที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ส่วนการจำลองเสาคอนกรีตจะใช้ตาม [4] การจำลองลูกถ้วย [5] และหม้อแปลงเครื่องวัด (CT และ VT) กรณีความถี่สูง (1 kHz – 10 MHz) [6,7] ถูกแทนด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ สำหรับการจำลองเสาคอนกรีต [4] มีความสูง 12 เมตร ใช้โมเดล LineZt_1 ถ้าเสิร์จอิมพัลส์แดนซ์ของเสาคอนกรีตกรณีหลายตัวนำ สามารถหาได้จากสมการ (1)

$$Z_{pole} = \frac{60}{\sqrt{(2 - \frac{1}{\epsilon_r}) \ln \left(\frac{2 + \sqrt{1 + \epsilon_r h^2}}{h} \right)}} \quad (1)$$

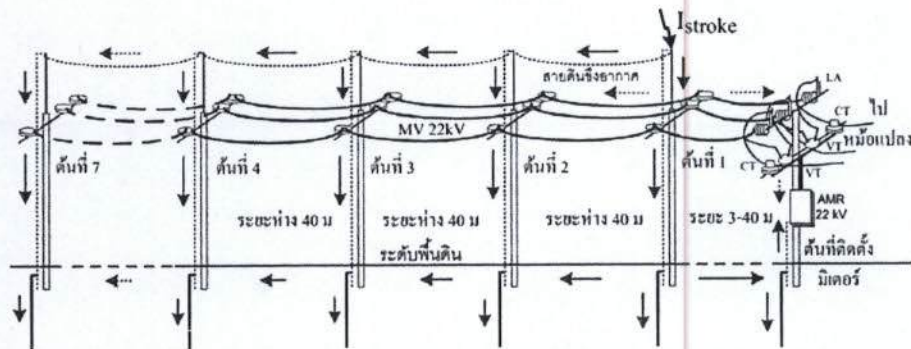
เมื่อ h = ความสูงของเสาไฟฟ้า (เมตร)

R = ความหนาของเสาคอนกรีต (เมตร)

ส่วนการจำลองรากสายดินจะจำลองความต้านทานดินอิมพัลส์และรากสายดินด้วยวงจร RLC ตาม [2] และจำลองกับดักฟ้าผ่า (LA) จะใช้ตามพิสัยของ กฟภ. ด้วยโมเดล MOV โดยสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้จำลองระบบ

Equipments	EMTP Model	Parameters
Line	LCC (J Marti)	AAC 185 mm ² for phase conductor R of phase conductor = 0.161 ohm/km Strand steel 35 mm ² for OHGW R of OHGW = 9.4 ohm/km Span 40 m [3]
Pole	LineZT_1	101 ohm at pole height of 12 m. [4]
Pin type Insulator	C	100 pF (unit) [5]
Instrument Transformer	C	Line-Line Capacitance 490 pF (VT) 310 pF (CT) [6,7]



รูปที่ 5 วงจรเพื่อใช้ศึกษาปัญหาแรงดันเกินบริเวณจุดต่อลงดินของมิเตอร์ AMR และทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าหลังจากทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 (ต่อ) พารามิเตอร์ที่ใช้จำลองระบบ

Equipments	EMTP Model	Parameters
Grounding of meter pole		$R = 5 \text{ ohm}$, $L = 3.07 \text{ uH}$ $C = 208.4 \text{ pF}$ [2]
Grounding of pole No. 1-7		$R = 10 \text{ ohm}$, $L = 1.957 \text{ uH}$ $C = 227 \text{ pF}$ [2]
Lightning Arrester	MOV	10 kA 24-26 kV [9]
Lightning source	Heilder	15,20,25,30,35,40 kA 8/20uS [9]
22 kV source	AC3PH	17.96 kV 50 Hz [9]

3.2 หัวข้อการศึกษาและการวิเคราะห์

การศึกษาและวิเคราะห์ค่าแรงดันที่จุดต่อลงดินของมิเตอร์จากประเด็นต่างๆ ดังนี้ คือ 1) ขนาดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 15-40 กิโลแอมแปร์ 2) ระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟ้าผ่าลงหัวเสาสายดินซึ่งอากาศที่ไกลออกไปจากเสาที่ติดตั้งมิเตอร์ (มิเตอร์ติดตั้งที่เสาปลายหรือ Dead end) ตั้งแต่ช่วง 1-7 ต้น 3) ศึกษาระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงของเสาที่ใกล้ที่สุดที่ติดตั้งสายดินซึ่งอากาศที่ฟ้าผ่าลงถึงตำแหน่งเสาที่ติดตั้งมิเตอร์ 4) ศึกษาผลกระทบที่มีค่าความต้านทานการต่อลงดินของเสาที่ติดตั้งมิเตอร์มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน 5) เส้นทางไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านจุดต่อลงดินของมิเตอร์

4. ผลการศึกษา

เมื่อทำการวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรม EMTP-ATP ตามสมมติฐานที่วางไว้ ได้ผลการศึกษาแยกตามกรณีดังต่อไปนี้

1) เมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 15-40 กิโลแอมแปร์ จะทำให้เกิดแรงดันที่จุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยพิจารณาจากแถวแนวดิ่งในตารางที่ 2 (เมื่อให้ระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟ้าผ่าลงหัวเสาสายดินซึ่งอากาศอยู่ห่างจากเสาติดตั้งมิเตอร์เป็นระยะคงที่) ซึ่งค่าแรงดันในตารางที่ 2 คือ แรงดันจุดต่อลงดินที่

เกินพิกัดแรงดันคงทนฟ้าผ่าของวาริสเตอร์ที่ 3.6 กิโลโวลต์ในตัวมิเตอร์ [8]

ตารางที่ 2 แรงดันที่จุดต่อลงดินของมิเตอร์ที่ตำแหน่งฟ้าผ่าลงระยะต่าง ๆ

เสาที่ฟ้าผ่าลง	แรงดันที่จุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์ AMR (kV)						
	1	2	3	4	5	6	7
ระยะห่างมิเตอร์ถึงจุดฟ้าผ่าลง	3 m	43 m	83 m	123 m	163 m	203 m	243 m
15kA	6.20	4.88	4.32	3.57	3.07	2.66	2.53
20kA	8.20	6.50	5.54	4.76	4.09	3.54	3.37
25kA	10.30	8.12	6.92	5.94	5.17	4.43	4.20
30kA	12.30	9.75	8.32	7.10	6.12	5.31	5.04
35kA	14.37	11.36	9.69	8.24	7.16	6.20	5.89
40kA	16.38	12.97	11.07	9.35	8.2	7.08	6.74

2) เมื่อระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟ้าผ่าลงหัวเสาสายดินซึ่งอากาศที่ไกลออกไปจากเสาที่ติดตั้งมิเตอร์ ความรุนแรงของแรงดันเหนี่ยวนำฟ้าผ่าที่จุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์จะมีค่าลดลง (จำลองฟ้าผ่าตั้งแต่หัวเสาต้นที่ 1-7 ที่ระยะห่างตั้งแต่ 3-243 เมตร และกำหนดให้ขนาดกระแสฟ้าผ่าคงที่) โดยพิจารณาจากแถวแนวนอนของตารางที่ 2

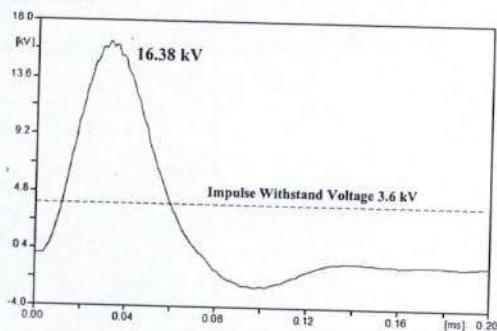
3) เมื่อระยะห่างของเสาต้นที่ 1 ที่ติดตั้งสายดินซึ่งอากาศที่ฟ้าผ่าลงอยู่ใกล้กับเสาที่ติดตั้งมิเตอร์มากขึ้น จะทำให้ระดับแรงดันที่จุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างเสาต้นที่ 1 ตั้งแต่ 3-40 เมตร และเพิ่มค่ากระแสฟ้าผ่าที่หัวเสาตั้งแต่ 15-40 กิโลแอมแปร์) ดังแสดงในรูปที่ 7

4) เมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินมีค่าสูงขึ้น (โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการต่อลงดินตั้งแต่ 5-30 โอห์ม ที่ระยะห่างจากจุดฟ้าผ่า 3 เมตร) พบว่าแรงดัน ณ จุดติดตั้งมิเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และความสามารถในการระบายกระแสลงดินมีค่าลดลง ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวาริสเตอร์ภายในมิเตอร์ AMR เพิ่มขึ้นเกินพิกัดความคงทนของวาริสเตอร์มากกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 8

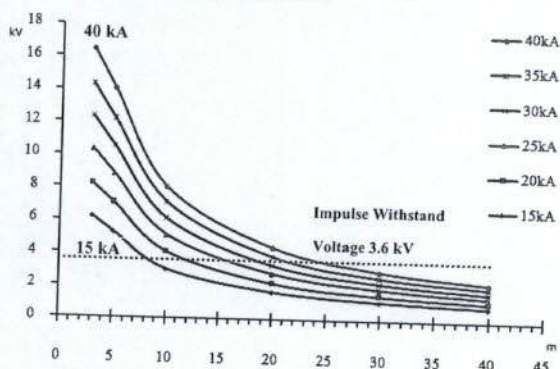
5) เส้นทางไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อจำลองการเกิดฟ้าผ่าลงหัวเสาสายดินซึ่งอากาศต้นที่ 1 แสดงในรูปที่ 5 พบว่าจะไหลออกจากจุดเกิดฟ้าผ่าทุกทิศทางลงดิน ซึ่งขนาดกระแสขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของเสานั้นๆ และกระแสส่วนใหญ่จะระบายสู่พื้นดินกระจายตัวตามโคนเสา ยิ่งห่างจากจุดฟ้าผ่ามาก ระดับกระแสจะลดลงตามด้วย แต่หากค่าความ

ด้านทานดินบริเวณนั้นๆ ค่า และมีระยะห่างของเสาที่ติดตั้งมิเตอร์ไม่มากพอ อาจทำให้มิเตอร์ชำรุดเสียหายเนื่องจากเกิดแรงดันเกินคกรวมจุดต่อลงดินของมิเตอร์ และพบอีกว่ามีกระแสบางส่วนเหนี่ยวนำผ่านสายเฟสสู่หม้อแปลงชุดวัดและลงสู่มิเตอร์เช่นกัน แต่มีปริมาณน้อยมาก (ในหน่วย mA) ซึ่งไม่สามารถทำความเสียหายแก่มิเตอร์ได้

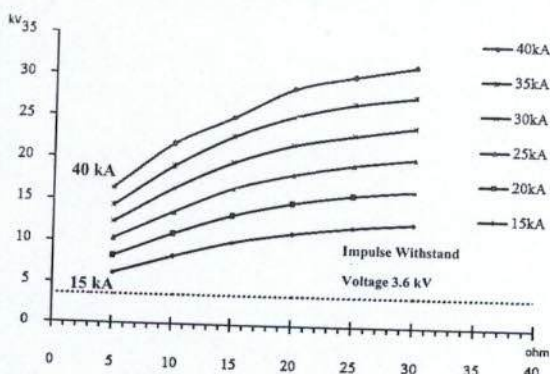
จากการศึกษาที่จุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์ AMR เมื่อจำลองกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 กิโลแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 3 เมตร ค่าความต้านทานดิน 5 โอห์ม ตามมาตรฐานของ กฟผ. จะเกิดแรงดันคกรวมสูงสุด 16.38 กิโลโวลต์ แสดงดังรูปที่ 6 และมีกระแสไหลผ่านจุดดังกล่าว 3.26 กิโลแอมแปร์



รูปที่ 6 แรงดันจุดต่อลงดินที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าสูงสุด 40 กิโลแอมแปร์ ที่ระยะห่างจากจุดฟ้าผ่า 3 เมตร



รูปที่ 7 แรงดันที่จุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์เทียบกับระยะห่างเสาต้นที่อยู่ใกล้ที่จำลองฟ้าผ่าตั้งแต่ 3-40 เมตร



รูปที่ 8 แรงดันจุดต่อลงดิน ณ ตำแหน่งติดตั้งมิเตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการต่อลงดินตั้งแต่ 5-30 โอห์มที่ระยะห่างจากจุดฟ้าผ่า 3 เมตร

5. สรุป

จากการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาสาเหตุการชำรุดของมิเตอร์ ด้วยโปรแกรม EMTP-ATP โดยใช้พารามิเตอร์จริงจาก กฟผ. พบว่าเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินซึ่งอากาศบริเวณใกล้กับเสาต้นที่ติดตั้งมิเตอร์จะเกิดกระแสบายลงดินผ่านหลักดินขึ้นสู่เสาต้นที่ติดตั้งมิเตอร์ทำให้แรงดันคกรวมจุดต่อลงดินที่ตัวมิเตอร์มีค่าสูงสุด 16.38 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่าง 3 เมตร ด้วยกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ (8/20uS) ซึ่งมีค่าสูงกว่าพิกัดแรงดันคกรวมของวาริสเตอร์ที่ใช้ระบายพลังงานฟ้าผ่าของมิเตอร์อยู่ถึง 12.78 กิโลโวลต์ หรือ 3.55 เท่า และในกรณีที่ค่าความต้านทานการต่อลงดินมีค่าสูงเกินมาตรฐาน (มากกว่า 5 โอห์ม) จะทำให้แรงดัน ณ จุดติดตั้งมิเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเกินพิกัดการป้องกันด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่กระแสฟ้าผ่า 15 กิโลแอมแปร์ และ 20 กิโลแอมแปร์ (8/20uS) มิเตอร์จะปลอดภัยจากแรงดันเกินฟ้าผ่า เมื่อเสาต้นที่ติดตั้งมิเตอร์อยู่ห่างจากเสาต้นที่เกิดฟ้าผ่าที่ระยะห่างมากกว่า 123 เมตรและ 203 เมตรตามลำดับ ซึ่งในทางปฏิบัติการควบคุมจุดที่ต้องการให้ฟ้าผ่าลงทำได้ยาก ดังนั้นแนวทางในการลดความเสียหายอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าหรือฟ้าผ่าเหนี่ยวนำระยะใกล้ จึงควรปรับปรุงโดยการเพิ่มพิกัดแรงดันคกรวมฟ้าผ่าของวาริสเตอร์ภายในตัวมิเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาการอ่านหน่วยด้วยระบบอัตโนมัติ และ กองวิจัย กฟผ. ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและข้อเสนอแนะต่างๆ ค่องานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dommel, H. W. EMTP theory book, 2nd Edition, May 1992
- [2] วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์, การต่อลงดินเส้น 5 อิมพัลส์อินพีเทนซ์, 2552.
- [3] กองแผนงานระบบไฟฟ้า, ค่าพารามิเตอร์สายระบบจำหน่ายและระบบสายส่ง, ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า กฟผ., 2548.
- [4] สำเริง อินทามะ, เสรีจิมพีเทนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีตอันเนื่องมาจากผลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ 2548.
- [5] กิตติ เลียงเกรือ, “แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่าระบบจำหน่าย 22 kV ที่อยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบ 115 kV”, วิทยานิพนธ์, 2546.
- [6] Alan Greenwood, Electrical Transients in power Systems, 2nd Edition, 1991, p-p 459-460.
- [7] IEEE Modeling and Analysis of System Transient Working Group, Modeling Guidelines For Fast Front Transient, IEEE Transaction on Delivery, Vol. 11, No.1, January 1996.
- [8] EPCOS, SIOV Metal Oxide Standard Serie, December 2007.
- [9] คณะทำงานจัดทำคู่มือการใช้งานโปรแกรม EMTP, การใช้โปรแกรม EMTP เบื้องต้น, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ธันวาคม 2550.