การศึกษาการสลับเฟสของสายตัวนำที่มีผลต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 115kV วงจรคู่ที่มีการวางตัวนำแบบเดลต้า

A study the conductors phase sequence affecting to electric field distribution of 115kV double circuit power transmission with delta arrangement conductors

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1] จุฑาศินี พรพุทธศรี[2] ธานิล ม่วงพูล[3] และ ศิริชัย โสภา[4]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม anone_91@hotmail.com

[2]สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

[4]สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่สายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ โดยบทความนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของการสลับเฟสของสายตัวนำที่มีการจัดเรียงตัวนำแบบเดลต้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 115kV วงจรคู่ โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับหาผลเฉลย ตลอดจนเปรียบเทียบผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสลับเฟสของสายตัวนำกับมาตรฐาน ICNIRP .ในขณะที่สายส่งรับภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัด ซึ่งผลการจำลองที่ได้จะนำไปสู่การออกแบบการเดินสายเพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่สายส่งน้อยที่สุด อีกทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่ปลายสายส่งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ: การสลับเฟส ระบบส่งกำลังไฟฟ้า สนามไฟฟ้า การจัดเรียงตัวนำ

Abstract

This paper presents the mathematical modelling of electric fields exposed from the transmission system in form of partial differential equation. The phase sequence of delta arrangement of line conductors in 115kV double circuit was determined while supplied to the full electric load. The MATLAB program was used for analyzing based on finite element method. Moreover, the simulation results compared with the ICNIRP standard. The simulation results can be the guideline to design conductor arrangement suitable for the lowest transmission losses and voltage regulation.

Keywords: Phase sequence, Transmission system, Electric field, Line arrangement

1. บทนำ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าในระยะทางที่ไกลจำเป็นอย่างยิ่งต้องเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งานมีกำลังงานสูญเสียเนื่องจากสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าน้อยลง และทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยเหตุนี้การเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อปริมาณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากสายส่งกำลังไฟฟ้ารวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายส่งย่อมมีการเปลี่ยนแปลง [1] เพื่อให้เกิดความสมดุลในระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะนิยมแก้ไขปัญหาเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าด้วยการสลับเฟสของสายตัวนำเป็นระยะ ซึ่งการสลับเฟสในบางระยะอาจส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าเกิดกว่าที่มาตรฐาน ICNIRP กำหนดไว้ บทความนี้ได้เล็งเห็นความสำคัญของปริมาณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสลับเฟสตัวนำของระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาดแรงดันไฟฟ้า 115kV ที่มีรูปแบบการวางตัวนำแบบเดลต้า สำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าชนิดวงจรคู่ โดยอาศัยการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนท์และเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐาน ICNIRP ที่กำหนดไว้สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ 50Hz

2. ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการจำลองผล

บทความนี้เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 115kV วงจรคู่ที่มีลักษณะการจัดวางตัวนำแบบเดลต้า[2] เมื่อมีการสลับเฟสของตัวนำ โดยโครงสร้างของสายตัวนำสายดินเหนือศีรษะ แสดงได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ข้อมูลลักษณะเฉพาะสายตัวนำของระบบ 115kV

ชนิดของสายตัวนำ	ACSR 400 sq.mm
พื้นที่หน้าตัดของสายจริง	380.1 sq.mm
จำนวนเส้นลวดของสายตัวนำ	61 เส้น
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด	2.85 mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตีเกลียว	25.35 mm

ตารางที่ 2 ข้อมูลลักษณะเฉพาะสายดินเหนือศีรษะของระบบ 115kV

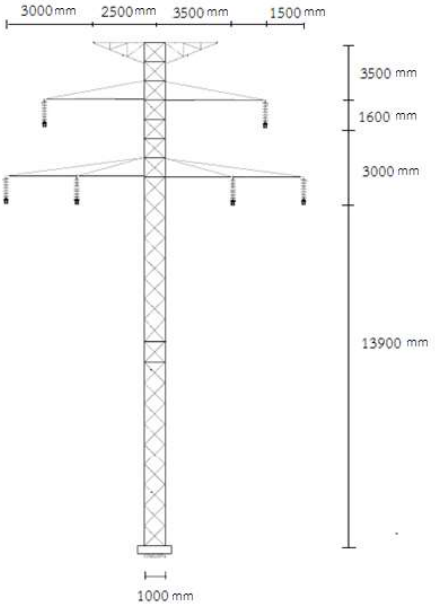
ชนิดของสายดินเหนือศีรษะ	Galvanize Sreel 35 sq.mm
พื้นที่หน้าตัดของสายจริง	31.67 sq.mm
จำนวนเส้นลวดของสายตัวนำ	7 เส้น

GN 40

ตารางที่ 2 ข้อมูลลักษณะเฉพาะสายดินเหนือศีรษะของระบบ 115kV(ต่อ)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด	2.85 mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตีเกลียว	2.50 mm
ค่า GMR	7.50 mm
รัศมีของสายตัวนำ	3.750 mm

รวมทั้งรูปแบบเสาส่งและคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างเสาส่งที่ใช้สำหรับการจำลองผลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าชนิดวงจรคู่ที่มีการวางตัวนำแบบเดลต้า

การจำลองผลจะดำเนินการแบ่งกลุ่มการสลับสายออกเป็น 6 กลุ่มซึ่งจะพิจารณาจากระยะ GMD ที่คงที่และเท่ากันแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กลุ่มการสลับสายของตัวนำสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 115kV วงจรคู่ ที่วางตัวนำแบบเดลต้า

รูปแบบ	GMD (m)	วงจรที่ 1			วงจรที่ 2		
กลุ่มที่ 1*	5.4186	A	B	C	A	B	C
กลุ่มที่ 2	5.4702	A	B	C	A	C	B
กลุ่มที่ 3	5.3784	A	B	C	B	A	C
กลุ่มที่ 4	5.4252	A	B	C	B	C	A
กลุ่มที่ 5	5.3846	A	B	C	C	B	A
กลุ่มที่ 6	5.3784	A	B	C	C	A	B

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและพารามิเตอร์

การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าในสภาวะคงตัวของระบบส่งกำลังไฟฟ้า บทความนี้ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ 2 มิติที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (1) [3]

$$\nabla^2\mathbf{E}-(\frac{1}{\nu^2})(\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2})-\mu\sigma(\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t})=0 \qquad (1)$$

จากคุณสมบัติของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เป็น time harmonic จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าเป็นดังนี้

$$\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\approx j\omega E \text{ และ } \frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2}\approx -\omega^2 E$$

โดยสามารถเขียนสมการที่ (1) เมื่อพิจารณาในรูปแบบ 2 มิติได้เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองได้ดังสมการที่ (2)

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 E}{\partial y^2}+(\mu\varepsilon\omega^2 - j\mu\sigma\omega)E=0 \qquad (2)$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ในแต่ละส่วนที่เพื่อใช้สำหรับการจำลองผลนั้นเป็นไปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลสนามไฟฟ้า[4]

วัสดุ	Relative permeability	Relative permittivity	Electrical conductivity
โครงเสาส่ง	4000	1	1.45*10^6
ลูกถ้วยไฟฟ้า	1	6	0
สายตัวนำ	1.000022	1.7	$3.538\text{x}10^7$

ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างด้วยวิธีกาเลอร์คินซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์โดยการกำหนดฟังก์ชั่นการถ่วงน้ำหนักให้เท่ากับฟังก์การประมาณภายในอิลิเมนท์จากนั้นดำเนินการจัดรูปสมการรวมของระบบให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นดังสมการที่(3) เพื่อหาค่าผลเฉลย [5]

$$[K]\{E\}=\{f\} \qquad (3)$$

โดยที่

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบรวม

E คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

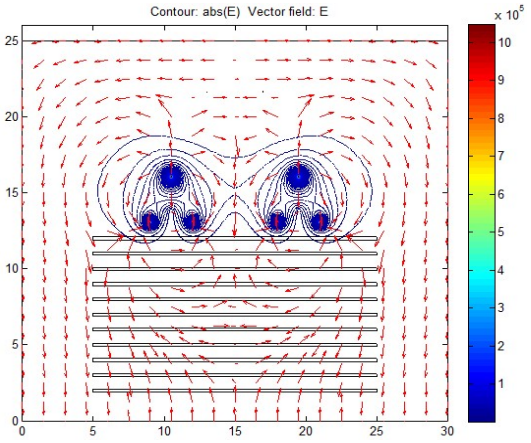
F คือ ค่าแรงภายนอกที่มากระทำ ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

$$[K]=\frac{1}{4\Delta_e}\begin{bmatrix} b_i^2 & b_ib_j & b_ib_k \\ b_ib_j & b_j^2 & b_jb_k \\ b_ib_k & b_kb_j & b_k^2 \end{bmatrix}+\frac{1}{4\Delta_e}\begin{bmatrix} c_i^2 & c_ic_j & c_ic_k \\ c_ic_j & c_j^2 & c_jc_k \\ c_ic_k & c_kc_j & c_k^2 \end{bmatrix}$$
$$-\frac{(-\mu\varepsilon\omega^2+j\mu\sigma\omega)\Delta_e}{12}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

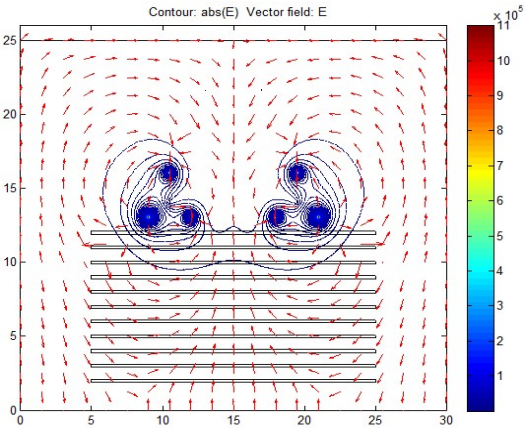
$$\{E\}=\begin{bmatrix} E_i \\ E_j \\ E_k \end{bmatrix} \text{ และ } \{f\}=\frac{Q\Delta_e}{3}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

4. ผลการจำลอง

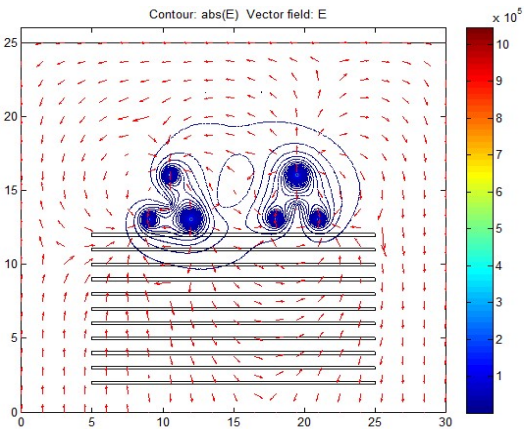
การจำลองผลอาศัยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนท์แบบ 2 มิติโดยบทความนี้มุ่งเน้นพิจารณาการกระจายค่าสนามไฟฟ้าทั้งสิ้น 2 บริเวณคือบริเวณความสูงจากระดับพื้นดิน 1 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีผู้คนสัญจรไปมา และบริเวณกลุ่มตัวนำเนื่องจากเป็นบริเวณที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของสายส่งโดยผลการจำลองในเชิงกราฟิกเมื่อมีการสลับสายตัวนำทั้ง 6 กลุ่มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-7



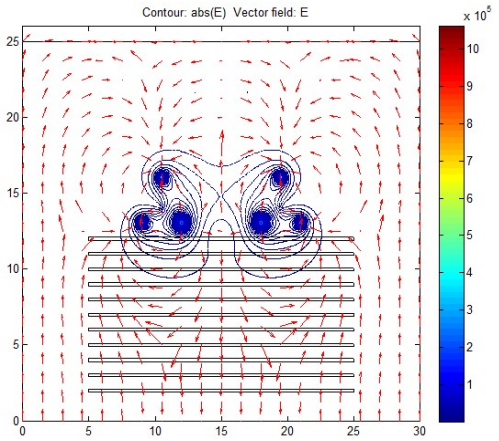
รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า (V/m) ของกลุ่มตัวนำกลุ่มที่ 1



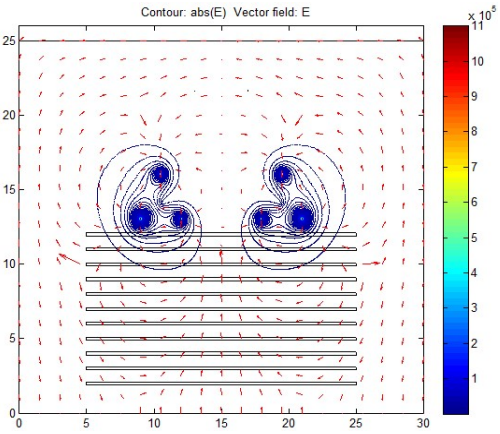
รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า (V/m) ของกลุ่มตัวนำกลุ่มที่ 2



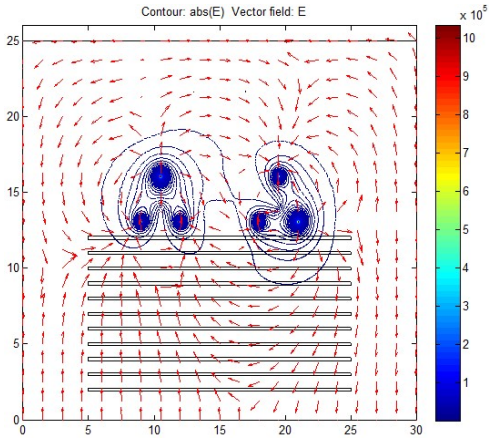
รูปที่ 4 ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า (V/m) ของกลุ่มตัวนำกลุ่มที่ 3



รูปที่ 5 ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า (V/m) ของกลุ่มตัวนำกลุ่มที่ 4



รูปที่ 6 ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า (V/m) ของกลุ่มตัวนำกลุ่มที่ 5



รูปที่ 7 ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า (V/m) ของกลุ่มตัวนำกลุ่มที่ 6

เมื่อพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าในเชิงตัวเลขที่บริเวณกลุ่มตัวนำ (กำหนดไว้ที่ 12 เมตร) และที่บริเวณความสูงจากพื้นดิน 1 เมตรโดยพิจารณาเพียงระยะทางเขตการเดินสายไฟตามข้อกำหนดความกว้างของเขตเดินสายไฟสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีระยะห่างความปลอดภัยต่ำสุดจากจุดกึ่งกลางเสาทั้งสองด้านไม่ต่ำกว่า 6 เมตรสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งกลุ่มตัวนำ (สูงจากระดับพื้นดิน 12 เมตร) ตามความกว้างของเขตเดินสายไฟ

สลับเฟส	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาส่งไปทางซ้าย (m)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาส่งไปทางขวา(m)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)	ผ่านมาตรฐาน ICNIRP หรือไม่
กลุ่มที่ 1	2	7.951	2	7.951	ไม่ผ่าน
	4	5.113	4	5.113	ไม่ผ่าน
	6	18.630	6	18.630	ไม่ผ่าน
กลุ่มที่ 2	2	17.660	2	17.660	ไม่ผ่าน
	4	9.876	4	9.876	ไม่ผ่าน
	6	12.545	6	12.545	ไม่ผ่าน
กลุ่มที่ 3	2	8.441	2	14.988	ไม่ผ่าน
	4	5.052	4	12.678	ไม่ผ่าน
	6	19.586	6	18.465	ไม่ผ่าน
กลุ่มที่ 4	2	16.991	2	16.991	ไม่ผ่าน
	4	12.691	4	12.691	ไม่ผ่าน
	6	19.411	6	19.411	ไม่ผ่าน
กลุ่มที่ 5	2	15.962	2	15.962	ไม่ผ่าน
	4	9.802	4	9.802	ไม่ผ่าน
	6	12.498	6	12.498	ไม่ผ่าน
กลุ่มที่ 6	2	14.988	2	8.441	ไม่ผ่าน
	4	12.680	4	5.052	ไม่ผ่าน
	6	18.465	6	19.586	ไม่ผ่าน

ตารางที่ 6 ค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งสูงจากระดับพื้นดิน 1 เมตร ตามความกว้างของเขตเดินสายไฟ

สลับเฟส	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาส่งไปทางซ้าย (m)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาส่งไปทางขวา(m)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)	ผ่านมาตรฐาน ICNIRP หรือไม่
กลุ่มที่ 1	2	0.102	2	0.102	ผ่าน
	4	0.152	4	0.152	ผ่าน
	6	0.202	6	0.202	ผ่าน
กลุ่มที่ 2	2	0.166	2	0.166	ผ่าน
	4	0.108	4	0.108	ผ่าน
	6	0.037	6	0.037	ผ่าน
กลุ่มที่ 3	2	0.038	2	0.157	ผ่าน
	4	0.102	4	0.198	ผ่าน
	6	0.181	6	0.217	ผ่าน
กลุ่มที่ 4	2	0.185	2	0.185	ผ่าน
	4	0.187	4	0.187	ผ่าน
	6	0.201	6	0.201	ผ่าน
กลุ่มที่ 5	2	0.094	2	0.094	ผ่าน
	4	0.055	4	0.055	ผ่าน
	6	0.009	6	0.009	ผ่าน

ตารางที่ 6 ค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งสูงจากระดับพื้นดิน 1 เมตร ตามความกว้างของเขตเดินสายไฟ (ต่อ)

สลับเฟส	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาส่งไปทางซ้าย (m)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาส่งไปทางขวา(m)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)	ผ่านมาตรฐาน ICNIRP หรือไม่
กลุ่มที่ 6	2	0.157	2	0.038	ผ่าน
	4	0.198	4	0.102	ผ่าน
	6	0.217	6	0.181	ผ่าน

จากผลในเชิงตัวเลขจะเห็นได้ว่า ที่ระยะความสูงจากระดับพื้นดิน 12 เมตรซึ่งเป็นบริเวณของกลุ่มตัวนำจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงและเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ICNIRP ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5kV/m สำหรับพื้นที่สาธารณะ จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณกลุ่มตัวนำจะมีค่าเกินมาตรฐานทุกกรณีที่มีการสลับเฟส อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันสนามไฟฟ้าและต้องกำหนดระยะเวลาปฏิบัติงานให้เป็นไปตามมาตรฐานอย่างเคร่งครัด เมื่อพิจารณาผลการสลับเฟสของตัวนำของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบเดลต้า จะได้ว่าการสลับเฟสตามรูปแบบของกลุ่มที่ 3 และ 6 จะทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าไม่สมดุล ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ของสายส่งด้วย และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งสูงกว่าระดับพื้นดิน 1 เมตรซึ่งเป็นบริเวณที่มีผู้คนสัญจรไปมา จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะสลับเฟสตัวนำทุกรูปแบบทำให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน ICNIRP กำหนด

5. สรุปผล

บทความนี้เป็นการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของสายส่งตัวนำของระบบ 115kV ที่มีรูปแบบการวางตัวนำแบบเดลต้าซึ่งส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าโดยที่การสลับเฟสตามรูปแบบที่ 1 2 4 และ 5 เป็นรูปแบบการสลับเฟสที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังปลายทางมีค่าสูงสุดและสามารถคงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยพิจารณาได้จากขนาดของสนามไฟฟ้ามีความสมดุลมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] Hadi Saadat, “Power System Analysis,” 4th ed.: Mc Graw-Hill, 1999, ch. 4, pp.102 – 135.

[2] *มาตรฐานการก่อสร้าง สายส่ง 115kV.* กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2549.

[3] อาคม แก้วระวัง, “สนามแม่เหล็กไฟฟ้า”. พิมพ์ครั้งที่ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2548.

[4] William. H. and John. B. “Engineering Electromagnetics”. McGraw-Hill Education, 2544.

[5] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. “ไฟไนท์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม”. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.กรุงเทพฯ. 2545.