

บทที่ 5

โปรแกรมจำลองผลสนามไฟฟ้าและผลการจำลองของระบบสายส่งแบบ 2 มิติ

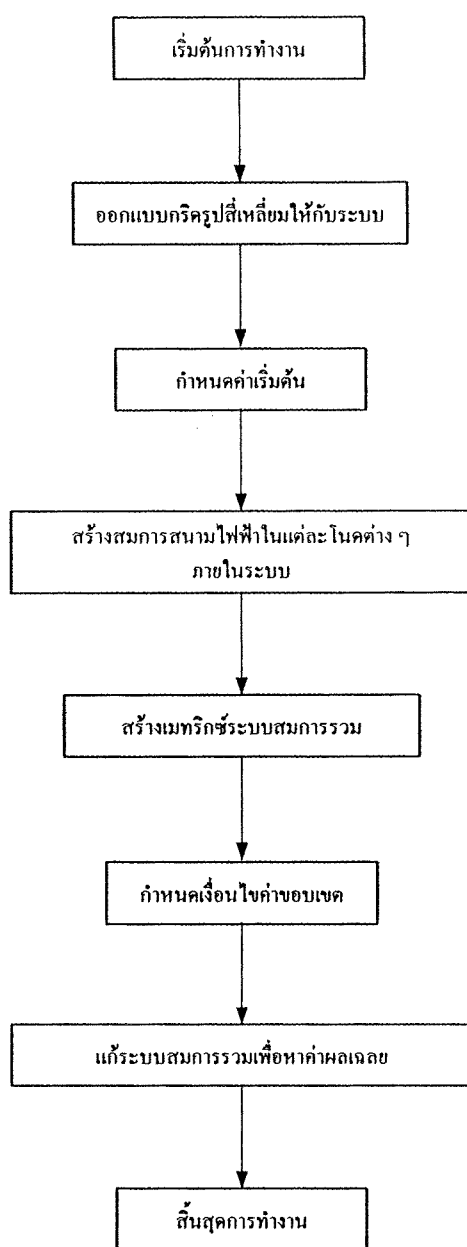
5.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นภายในบทที่ 5 จึงกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ รวมถึงการดำเนินการเปรียบเทียบผลค่าสนามไฟฟ้ากับโปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL โปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB™ ภายในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ Intel Pentium IV dual cores 3.0 GHz 1GB เพื่อประมวลผลหาค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟสแบบ 2 มิติ

การจำลองผลมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าสนามไฟฟ้า ซึ่งภายในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธี 2 วิธี คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นพื้นฐานสำคัญในการเขียนโปรแกรมหาค่าผลเฉลยของค่าสนามไฟฟ้า โดยหลักการเขียนโปรแกรมทั้ง 2 วิธีจะมีหลักการคล้ายคลึงกัน คือ เริ่มจากการออกแบบกริดตามขนาดรูปร่างของระบบ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะใช้กริดรูปสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะใช้กริดรูปสามเหลี่ยม จากนั้นสร้างสมการสนามไฟฟ้า สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะดำเนินการสร้างสมการในลักษณะตามโนดต่าง ๆ ภายในระบบ ในขณะที่ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะสร้างสมการตามแต่ละอีลิเมนต์ที่ปรากฏขึ้นในระบบแทน เมื่อได้สมการที่อธิบายคุณสมบัติตามโนดหรืออีลิเมนต์ตามแต่ละวิธีแล้ว จากนั้นจะทำการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม โดยนำสมการที่ได้จากการพัฒนาตามโนดหรืออีลิเมนต์ต่าง ๆ ตามแต่ละวิธีมารวมกันเป็นเมทริกซ์ที่มีขนาดใหญ่ หลังจากได้เมทริกซ์ระบบสมการรวมจะทำการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต และแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลยอันเป็นการสิ้นสุดการทำงาน สำหรับรายละเอียดของโปรแกรม 2 วิธีดังกล่าวสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

5.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถดำเนินการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ตามขั้นตอนภายในโครงสร้างโปรแกรมของแผนภูมิรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

5.2.1 โปรแกรมออกแบบกริดรูปสี่เหลี่ยมให้กับระบบ

โปรแกรมสร้างกริดของระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะมีโครงสร้างของโปรแกรมที่ไม่ซับซ้อนมากนัก โดยจุดประสงค์หลักของโปรแกรมส่วนนี้ คือ การสร้างเมทริกซ์ที่มีสมาชิกภายในเป็นหมายเลขโนดต่าง ๆ ตามการกำหนดขนาดของระบบที่ต้องการศึกษา เช่น งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 69 kV โดยระบบมีความกว้าง 8 m และความสูง 12 m กำหนดให้สมาชิกภายในเมทริกซ์ของระบบรวม คือ หมายเลขโนดต่าง ๆ ของระบบ โดยระยะห่างระหว่างโนดแทนระยะห่างเท่ากับ 0.1 m นั้นหมายความว่าถ้าระบบมีความกว้าง 8 m จะมีจำนวนโนดปรากฏตามแนวแถวของเมทริกซ์ระบบรวมเท่ากับ $(8 \times 0.1) + 1 = 81$ โหนด และถ้าความสูง 12 m จะมีจำนวน โหนดปรากฏตามแนวหลักของเมทริกซ์ระบบรวม คือ $(12 \times 0.1) + 1 = 121$ โหนด และท้ายสุดจะได้เมทริกซ์หมายเลขโนด (N_node) ขนาด 81×121 ตามสมการที่ (5-1)

$$N_node = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 79 & 80 & 81 \\ 82 & 83 & 84 & \dots & \dots & \dots & \dots & 160 & 161 & 162 \\ 163 & 164 & 165 & \dots & \dots & \dots & \dots & 241 & 242 & 243 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \ddots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 9559 & 9560 & 9561 & \dots & \dots & \dots & \dots & 9637 & 9638 & 9639 \\ 9640 & 9641 & 9642 & \dots & \dots & \dots & \dots & 9718 & 9719 & 9720 \\ 9721 & 9722 & 9723 & \dots & \dots & \dots & \dots & 9799 & 9800 & 9801 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

หลังจากได้เมทริกซ์หมายเลขโนด สิ่งที่ต้องพัฒนาเพิ่ม คือ เมทริกซ์ที่แสดงการจัดกลุ่มพื้นที่ของโนดต่าง ๆ ให้เป็นหมวดหมู่ เพื่อให้ง่ายสำหรับการบ่งชี้ถึงวัตถุแต่ละกลุ่มพื้นที่ที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน และสะดวกต่อการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต

5.2.2 กำหนดค่าเริ่มต้น

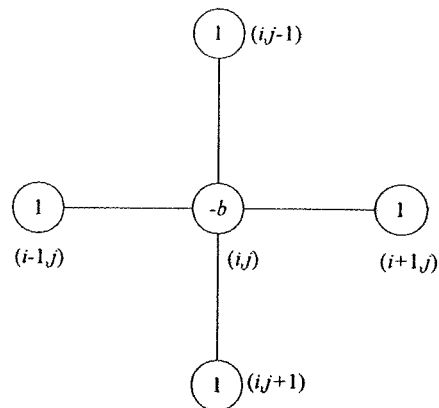
การจำลองผลสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟสภายในบทนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นของระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ซึ่งได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 5.1 ดังมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่ (f)	50 Hz
สภาพขาคีมได้ทางแม่เหล็กในสูญญากาศ(μ_0)	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
สภาพขาคีมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ในอากาศ (μ_r)	1.00000037
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าในสูญญากาศ (ϵ_0)	8.854×10^{-12} F/m
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ในอากาศ (ϵ_r)	1
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ในมนุษย์ (ϵ_r)	5

5.2.3 การสร้างสมการค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละโนด

ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้ใช้กริดรูปสี่เหลี่ยม ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ จากสมการที่ (5-1) จะเห็นว่าตำแหน่งสมาชิกภายในเมทริกซ์ดังกล่าวมีการวางตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นจากความรู้ในบทที่ 3 โครงสร้างทั่วไปของระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 4.1 หรือถูกนำเสนอใหม่ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของระเบียบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ คำนึงถึงค่าสภาพยอมของวัตถุที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการสร้างสมการค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละ โหนดจึงสามารถสร้างได้ 3 ลักษณะ คือ บริเวณที่เป็นอากาศ หรือ บริเวณที่เป็นร่างกายของมนุษย์แต่เพียงอย่างเดียว กับ บริเวณเนื้อสมระหว่างวัตถุทั้ง 2 ชนิด ซึ่งเคย

แสดงสมการทั้ง 3 ลักษณะภายในบทที่ 4 โดยขอนำเสนอสมการดังกล่าวมาแสดงใหม่ในสมการที่ (5-2) (5-3) และ (5-4) ตามลำดับ

อากาศ:

$$E(i, j) = \frac{1}{(4 - \varepsilon_0 \mu \omega^2 h^2)} [E(i+1, j) + E(i-1, j) + E(i, j+1) + E(i, j-1)] \quad (5-2)$$

มนุษย์:

$$E(i, j) = \frac{1}{(4 - 5\varepsilon_0 \mu \omega^2 h^2)} [E(i+1, j) + E(i-1, j) + E(i, j+1) + E(i, j-1)] \quad (5-3)$$

รอยต่อระหว่างมนุษย์กับอากาศ:

$$E(i, j) = \frac{\varepsilon_1}{2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} E(i, j-1) + \frac{\varepsilon_2}{2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} E(i, j+1) + \frac{1}{4} E(i-1, j) + \frac{1}{4} E(i+1, j) \quad (5-4)$$

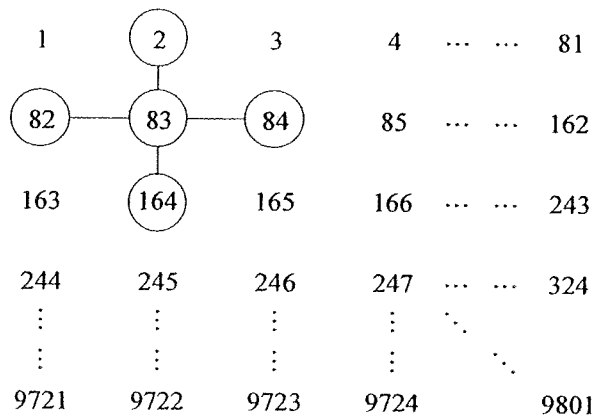
นอกจากนี้บางบริเวณที่อยู่ตามขอบและมุมของระบบจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันไปโดยสามารถแสดงโครงสร้างและสมการที่ใช้อธิบายค่าสนามไฟฟ้า ณ บริเวณขอบแบบต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดตามตารางที่ 4.1 ดังที่ได้นำเสนอผ่านมาในบทที่ 4

5.2.4 การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม

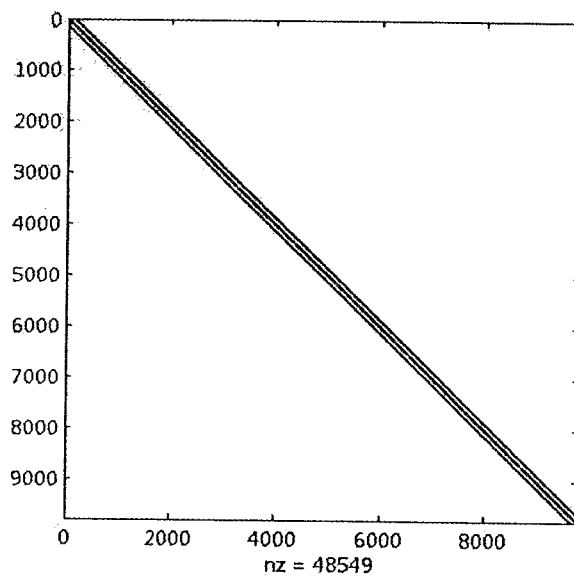
หลังจากได้สมการที่ใช้อธิบายโนดต่าง ๆ อย่างเหมาะสมภายในระบบ โปรแกรมย่อยส่วนนี้จะทำหน้าที่รวบรวมสมการแต่ละโนดที่คำนวณจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ เข้ามาเป็นเมทริกซ์ขนาดใหญ่ของระบบสมการดังแสดงด้วยสมการที่ (4-12) การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวมของระเบียบวิธีนี้มีหลักการ คือ หาหมายเลขโนดที่แท้จริงที่อยู่รอบ ๆ โหนดที่กำลังพิจารณาอยู่แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของโนดนั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ถ้าลักษณะของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นโนดทั้งหมด n โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ เช่น ในรูปที่ 5.3 โหนดที่พิจารณา คือ ตำแหน่งโนดที่ 83 โดยมีตำแหน่งโนดรอบข้าง คือ ตำแหน่งโนดที่ 2 ตำแหน่งโนดที่ 82 ตำแหน่งโนดที่ 84 และตำแหน่งโนด

ที่ 164 สมมติให้บริเวณตำแหน่งที่พิจารณาเป็นบริเวณที่มีอากาศอย่างเดียวก ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของตำแหน่งโนดรอบข้างจะมีค่าเท่ากับ 1 1 1 และ 1 ตามลำดับ ในขณะที่โนดที่พิจารณาจะมีสัมประสิทธิ์เท่ากับ $4 - \epsilon_0 \mu \omega^2 h^2$ จากสมการที่ (5-2) จะได้

$$-(4 - \epsilon_0 \mu \omega^2 h^2)E(i, j) + (1)E(i+1, j) + (1)E(i-1, j) + (1)E(i, j+1) + (1)E(i, j-1) = 0 \quad (5-5)$$



รูปที่ 5.3 การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม



รูปที่ 5.4 ลักษณะการวางตัวของสมาชิกภายในเมทริกซ์ของระบบสมการรวม

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์หน้า $E(i, j)$ $E(i+1, j)$ $E(i-1, j)$ $E(i, j+1)$ และ $E(i, j-1)$ จากสมการที่ (5-5) มาแทนค่าใส่เมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมในแถวที่ 83 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของ $E(i, j)$ $E(i+1, j)$ $E(i-1, j)$ $E(i, j+1)$ และ $E(i, j-1)$ จะถูกป้อนลงในหลักที่ 2 82 84 และ 164 ของแถวนั้น จึงเป็นการรวมสมการของระบบสมการรวมเสร็จเพียง 1 โหนด ถ้าระบบที่ทำการคำนวณถูกแบ่งออกเป็นโหนดทั้งหมด n โหนด จะต้องทำการรวมสมการของระบบสมการรวมทั้งหมด n ครั้ง เมื่อทำสำเร็จจะได้ลักษณะการวางตัวของสมาชิกที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ของระบบสมการรวมดังรูปที่ 5.4

5.2.5 กำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต

ขั้นตอนส่วนนี้จะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการ คือ คัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (4-12) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของตัวนำสายส่งในรูปของสนามไฟฟ้าทั้งกรณี 1 เฟสและ 3 เฟส กับโทรศัพท์มือถือที่มีการกระจายค่าสนามไฟฟ้าคงที่โดยรอบขนาด $10 \times 20 \text{ cm}^2$ (nokia3210) ดังรูปที่ 4.6(a) ในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตของระบบไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ ได้ดังนี้

ระบบไฟฟ้า 1 เฟส

- ระบบไฟฟ้าขนาด 69 kV:

$$v = 69 \text{ kV} \quad E = 8.8284 \times 10^4 \text{ V/m}$$

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส (เฟสสมดุล)

- ระบบไฟฟ้าขนาด 230 kV:

เฟส A (0°)

$$v = 230 \text{ kV} \quad E = 2.8202 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส B (-120°)

$$v = 230 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.4101 \times 10^5 - j2.4425 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส C (120°)

$$v = 230 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.4101 \times 10^5 + j2.4425 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- ระบบไฟฟ้าขนาด 500 kV:

เฟส A (0°)

$$v = 500 \text{ kV} \quad E = 6.0134 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส B (-120°)

$$v = 500 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad E = -3.0067 \times 10^5 - j5.2077 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส C (120°)

$$v = 500 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad E = -3.0067 \times 10^5 + j5.2077 \times 10^5 \text{ V/m}$$

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส (เฟสไม่สมดุล)

สำหรับกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลจะทำการศึกษาเฉพาะระบบไฟฟ้าขนาด 230 kV เพื่อให้พอเห็นภาพลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเมื่อระบบไม่มีความสมดุล ซึ่งลักษณะความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถแยกศึกษาได้ 2 กรณี คือ กรณีขนาดไม่สมดุล (เฟสคงที่) กับกรณีมุมเฟสไม่สมดุล (ขนาดคงที่) ซึ่งมีรายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล ได้ดังนี้

ขนาดไม่สมดุล ($\pm 10\%$ ของขนาดเฟสอ้างอิง)

- กรณีเฟส A (เฟสอ้างอิง)

$$v = 230 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad E = 2.8202 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส B (-10%)

$$v = 207 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.269 \times 10^5 - j2.1981 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส C ($+10\%$)

$$v = 253 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.5511 \times 10^5 + j2.6865 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- กรณีเฟส B (เฟสอ้างอิง)

$$v = 230 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.4101 \times 10^5 - j2.4424 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส C (-10%)

$$v = 207 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.269 \times 10^5 + j2.1981 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส A ($+10\%$)

$$v = 253 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad E = 3.1022 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- กรณีเฟส C (เฟสอ้างอิง)

$$v = 230 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.4101 \times 10^5 + j2.4424 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส A (-10%)

$$v = 207 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad E = 2.5382 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส B (+10%)

$$v = 253 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.5511 \times 10^5 - j2.6865 \times 10^5 \text{ V/m}$$

มุมเฟสไม่สมดุล ($\pm 30^\circ$ ของมุมเฟสอ้างอิง)

- กรณีเฟส A (เฟสอ้างอิง)

$$v = 230 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad E = 2.8202 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส B (-30°)

$$v = 230 \angle -150^\circ \text{ kV} \quad E = 2.4424 \times 10^5 - j1.4101 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส C (+30°)

$$v = 230 \angle 150^\circ \text{ kV} \quad E = -2.4424 \times 10^5 + j1.4101 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- กรณีเฟส B (เฟสอ้างอิง)

$$v = 230 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.4101 \times 10^5 - j2.4424 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส C (-30°)

$$v = 230 \angle 90^\circ \text{ kV} \quad E = j2.8202 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส A (+30°)

$$v = 230 \angle 30^\circ \text{ kV} \quad E = 2.4424 \times 10^5 + j1.4101 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- กรณีเฟส C (เฟสอ้างอิง)

$$v = 230 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad E = -1.4101 \times 10^5 + j2.4424 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส A (-30°)

$$v = 230 \angle -30^\circ \text{ kV} \quad E = 2.4424 \times 10^5 - j1.4101 \times 10^5 \text{ V/m}$$

เฟส B (+30°)

$$v = 230 \angle -90^\circ \text{ kV} \quad E = -j2.8202 \times 10^5 \text{ V/m}$$

โทรศัพท์มือถือ

ตำแหน่งบนซ้ายและตำแหน่งบนขวา

$$E = 45.5 \text{ V/m}$$

ตำแหน่งกลางซ้าย

$$E = 33.5 \text{ V/m}$$

ตำแหน่งกลางขวา

$$E = 48.2 \text{ V/m}$$

ตำแหน่งล่างซ้ายและตำแหน่งบนขวา

$$E = 48.5 \text{ V/m}$$

5.2.6 แก่ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย

ขั้นตอนสุดท้ายส่วนนี้จะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวมโดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน (matrix inverse) เนื่องจากเมทริกซ์มีลักษณะสมมาตร และค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ระบบสมการรวมไม่เป็นศูนย์จึงสามารถคำนวณหาค่าผลเฉลยด้วยวิธีนี้ได้ดังสมการที่ (4.17) ในบทที่ 4

5.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างโปรแกรมของแผนภูมิรูปที่ 5.5

5.3.1 โปรแกรมออกแบบกริดรูปสามเหลี่ยมให้กับระบบ

โครงสร้างโปรแกรมสร้างกริดของขั้นตอนนี้ประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกัน ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

โปรแกรมสร้างกริดเริ่มต้นทำงานจากการรับค่าอินพุตเป็นเมทริกซ์ที่มีขนาดต่าง ๆ กันซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างรูปร่างมนุษย์ ตัวนำในสายส่ง โทรศัพท์มือถือ และพื้นที่โล่งบริเวณที่เป็นอากาศ โดยเมทริกซ์ดังกล่าวถือเป็นการรับข้อมูลที่สำคัญในการดำเนินการช่วงแรกของโปรแกรมหลัก จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการระบุหมายเลขของเอลิเมนต์ และหมายเลขของโนด พร้อมทั้งตำแหน่งค่าพิกัดของแต่ละโนดในส่วนของวัตถุต่าง ๆ ภายในระบบ เช่น การหาดำแหน่งค่าพิกัดของแต่ละโนดของโครงสร้างร่างกายมนุษย์ ตัวนำในสายส่ง โทรศัพท์มือถือ และบริเวณ

อากาศรอบ ๆ วัตถุ เพื่อให้่ายต่อการระบุถึงวัตถุแต่ละชนิดที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันจะทำการจัดกลุ่มพื้นที่ของแต่ละอิเลิเมนต์ และ โหนดต่าง ๆ ให้เป็นหมวดหมู่ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตซึ่งขั้นตอนดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังมีรายละเอียดในโปรแกรมย่อย

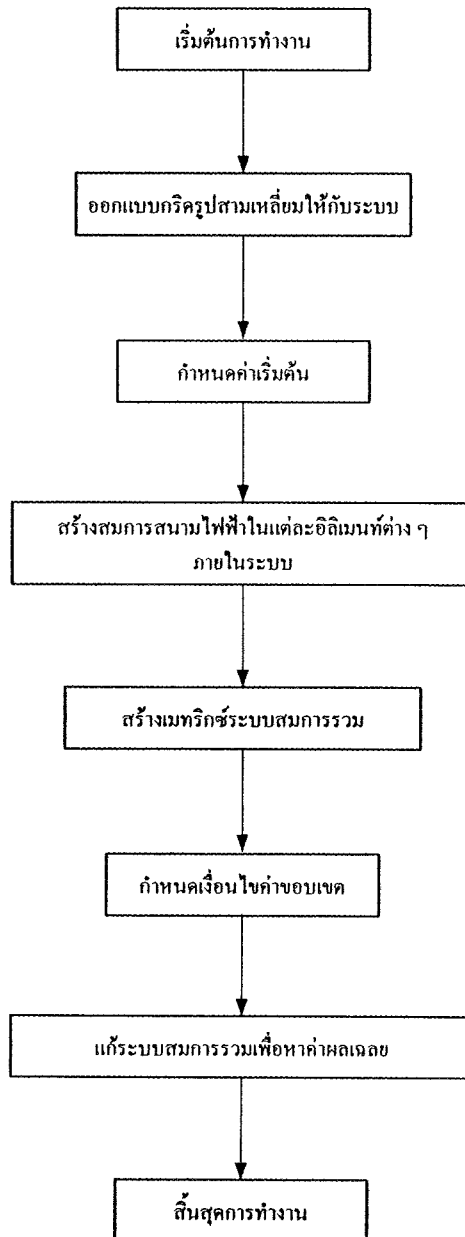
ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิเลิเมนต์และหมายเลขของ โหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละโหนดในส่วนในพื้นที่ที่เป็นอากาศ จากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 69 kV จะมีบริเวณที่เป็นอากาศทั้งหมด 6 บริเวณ โดยสิ่งที่สำคัญที่สุด คือ ภายในอากาศแต่ละบริเวณจะต้องทราบหมายเลขโหนดของเมทริกซ์ในแต่ละบริเวณดังกล่าวให้ถูกต้อง เช่น อากาศบริเวณที่ 2 เป็นเมทริกซ์ขนาด 9×2 มีสมาชิกภายในเมทริกซ์เป็นหมายเลขโหนดต่าง ๆ ดังสมการที่ (5-6)

$$N_{sp2} = \begin{bmatrix} 12 & 13 \\ 0 & 0 \\ 31 & 32 \\ 0 & 0 \\ 61 & 62 \\ 0 & 0 \\ 91 & 92 \\ 0 & 0 \\ 116 & 117 \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

ซึ่งโปรแกรมส่วนนี้จะดำเนินการหาเมทริกซ์ที่แทนหมายเลข โหนดของแต่ละบริเวณจำนวนทั้งหมด 6 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันนี้ คือ อากาศบริเวณที่ 1 เป็นเมทริกซ์ขนาด 2×51 อากาศบริเวณที่ 2 กับ 3 เป็นเมทริกซ์ขนาด 9×2 อากาศบริเวณที่ 4 เป็นเมทริกซ์ขนาด 8×51 และ อากาศบริเวณที่ 5 กับ 6 เป็นเมทริกซ์ขนาด 31×6

หลังจากได้เมทริกซ์หมายเลขโหนดของบริเวณทั้งหมด 6 บริเวณ จากนั้นนำเมทริกซ์ดังกล่าวเข้าโปรแกรมย่อยที่คำนวณหาหมายเลขของอิเลิเมนต์ หมายเลขลำดับ โหนด และ ค่าพิกัดของแต่ละโหนด เช่น อากาศบริเวณที่ 2 ซึ่งสามารถแสดงด้วยเมทริกซ์ที่แทนหมายเลขของอิเลิเมนต์ หมายเลขลำดับ โหนด และค่าพิกัดของแต่ละโหนดดังนี้

$$Nspace_zone2 = \begin{bmatrix} 21 & 12 & 31 & 32 \\ 22 & 12 & 32 & 13 \\ 23 & 31 & 61 & 62 \\ 24 & 31 & 62 & 32 \\ 25 & 61 & 91 & 92 \\ 26 & 61 & 92 & 62 \\ 27 & 91 & 116 & 117 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$



รูปที่ 5.5 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเล็กเมนต์

โดยที่หลักที่ 1 ของเมทริกซ์ Nspace_zone2 แทนหมายเลขของอิเลิเมนต์ และ หลักที่ 2-4 แทนหมายเลขลำดับ โหนดของแต่ละอิเลิเมนต์

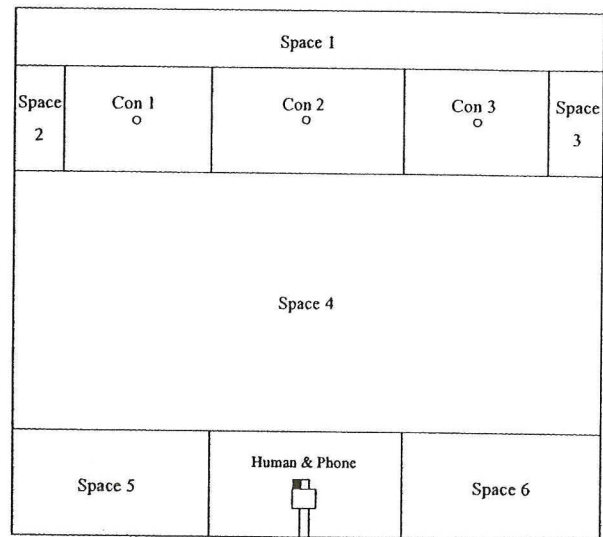
จากสมการที่ (5-8) หลักที่ 1 ของเมทริกซ์ node_s2 แทนหมายเลข โหนดของอากาศ บริเวณที่ 2 และหลักที่ 2 ถึง 3 แทนตำแหน่งค่าพิกัดแกน x และ แกน y ของแต่ละ โหนดตามลำดับ

$$\text{node_s2} = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 14 \\ 13 & 1 & 14 \\ 31 & 0 & 13 \\ 32 & 1 & 13 \\ 61 & 0 & 12 \\ 62 & 1 & 12 \\ 91 & 0 & 11 \\ 92 & 1 & 11 \\ 116 & 0 & 10 \\ 117 & 1 & 10 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิเลิเมนต์และหมายเลขของ โหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละ โหนดในส่วนของโครงสร้างร่างกายมนุษย์ เมื่อขณะใช้อุปกรณ์สื่อสาร ซึ่งสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกับการคำนวณหาหมายเลขของอิเลิเมนต์ หมายเลขลำดับ โหนด และค่าพิกัดของแต่ละ โหนดในส่วนของตัวนำภายในสายส่ง

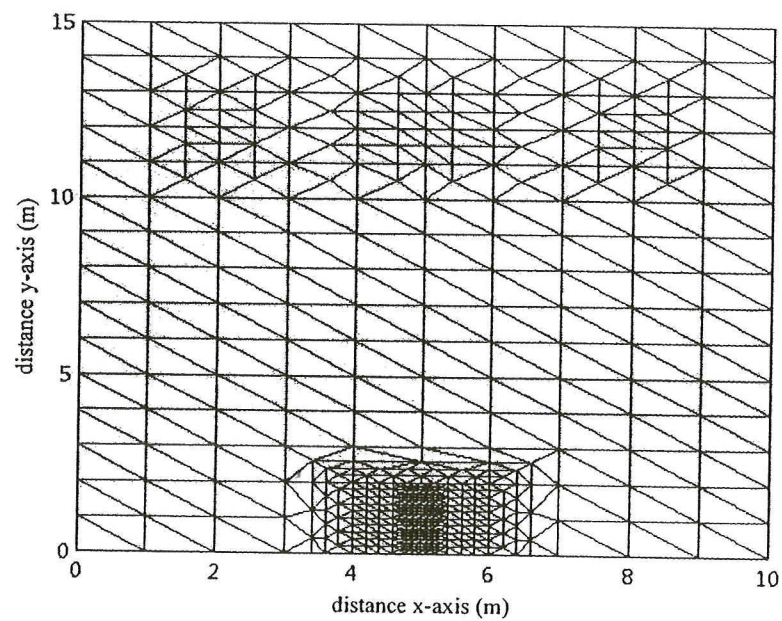
สำหรับ ขั้นตอนการระบุหมายเลขของอิเลิเมนต์และหมายเลขของ โหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละ โหนดในส่วนของตัวนำภายในสายส่ง จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 69 kV จะมีบริเวณตัวนำทั้งหมด 3 บริเวณ ซึ่งสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกับการคำนวณหา หมายเลขของอิเลิเมนต์ หมายเลขลำดับ โหนด และค่าพิกัดของแต่ละ โหนดในส่วนของตัวนำภายในสายส่ง และรูปร่างของมนุษย์ขณะใช้อุปกรณ์สื่อสาร

หลังจากคำนวณหาหมายเลขของอิเลิเมนต์ หมายเลขลำดับ โหนด และค่าพิกัดของแต่ละ โหนดของแต่ละวัตถุภายในระบบ ขั้นตอนต่อไปจะนำข้อมูลที่คำนวณได้มาวาดภาพแสดงการวางตัวของแต่ละอิเลิเมนต์ตลอดทั้งพื้นที่ของระบบที่พิจารณาคำสั่ง triplot ในโปรแกรม MATLAB™ โดยขั้นตอนนี้จะนำเสนอตำแหน่งการวางตัวของแต่ละ โหนดในบริเวณต่าง ๆ เช่น บริเวณอากาศโดยรอบตัวนำใน สายส่ง และ มนุษย์ ซึ่งสามารถแสดงภาพรวมของระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 69 kV ได้ดังรูปที่ 5.7 และสามารถแสดงการตีกริดเฉพาะที่ของบริเวณที่เป็นอากาศตัวนำในสายส่ง และ มนุษย์ได้ดังรูปที่ 5.8-5.11



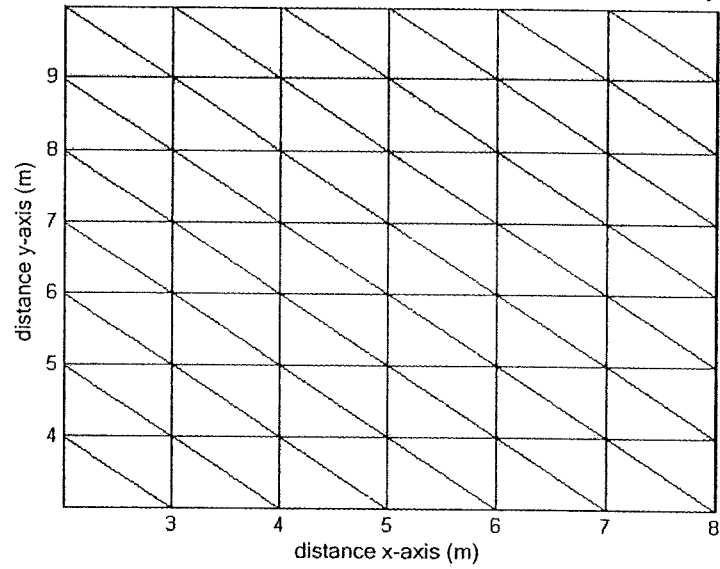
รูปที่ 5.6 การแบ่งพื้นที่เป็นหมวดหมู่ตามลักษณะความแตกต่างของวัตถุ

Triangular grid design for calculation FEM in 69 kV Transmission line system



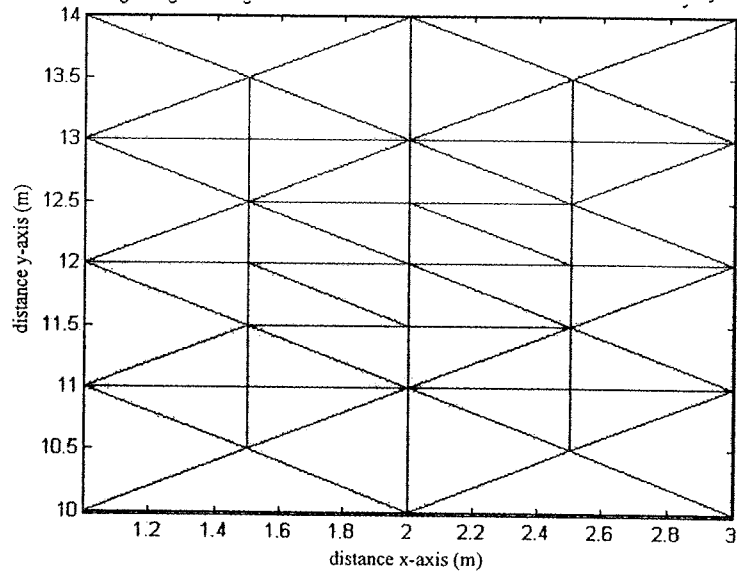
รูปที่ 5.7 ลักษณะการสร้างกริดภายในระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 69 kV

Triangular grid design for Calculation FEM in 69 kV Transmission line system

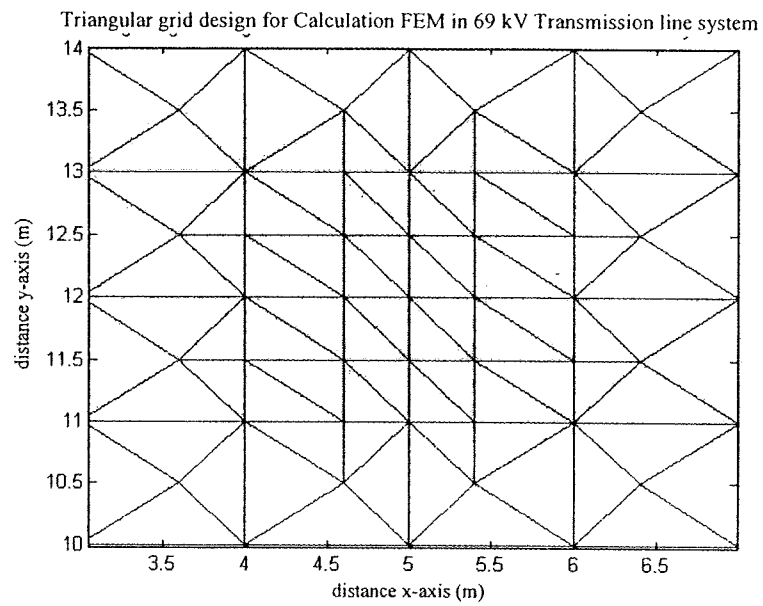


รูปที่ 5.8 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นอากาศ

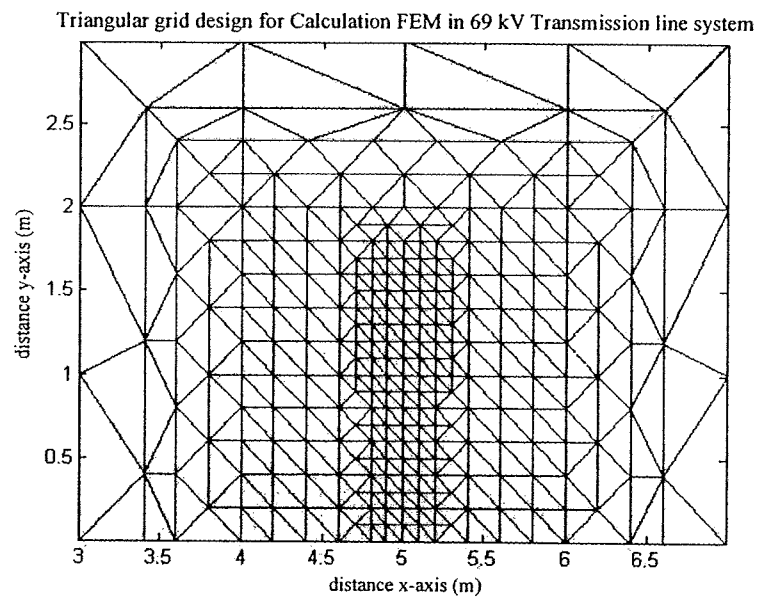
Triangular grid design for Calculation FEM in 69 kV Transmission line system



รูปที่ 5.9 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นตัวนำสายส่งตัวที่ 1 และ 3



รูปที่ 5.10 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นตัวนำสายส่งตัวที่ 2



รูปที่ 5.11 ลักษณะการสร้างกริดในบริเวณที่เป็นมนุษย์

5.3.2 กำหนดค่าเริ่มต้น

การจำลองผลสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นเช่นเดียวกับระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ซึ่งได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 5.1

5.3.3 การสร้างสมการค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ใช้กริดรูปสามเหลี่ยม ในการพัฒนาสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละอิลิเมนต์ เนื่องจากภายในระบบมีวัตถุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิด คือ อากาศกับร่างกายของมนุษย์ ซึ่งทั้งสองมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 1 และ 5 ตามลำดับ จากสมการที่ (5-35) เป็นสมการสนามไฟฟ้าในอิลิเมนต์ที่อยู่ในบริเวณอากาศ กับสมการที่ (5-36) เป็นสมการสนามไฟฟ้าในอิลิเมนต์ที่อยู่ในโครงสร้างรูปร่างมนุษย์ ซึ่งทั้งสองสมการสามารถนำมาเสนอใหม่ดังสมการที่ (5-9) และ (5-10) ตามลำดับ

อากาศ:

$$[K^{(e)}] = \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix} - \frac{\mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

มนุษย์:

$$[K^{(e)}] = \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix} - \frac{5\mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

5.3.4 การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม

หลังจากได้สมการที่ใช้อธิบายอิลิเมนต์ต่าง ๆ อย่างเหมาะสมภายในระบบโปรแกรมย่อยส่วนนี้จะทำหน้าที่รวบรวมสมการแต่ละอิลิเมนต์ที่คำนวณจากขั้นตอนก่อนหน้านี้เข้ามาเป็นเมทริกซ์ขนาดใหญ่ของระบบสมการดังแสดงด้วยสมการที่ (4-12) การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวมของระเบียบวิธีนี้มีหลักการ คือ หาหมายเลขโนดที่แท้จริงของอิลิเมนต์ที่กำลังพิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง

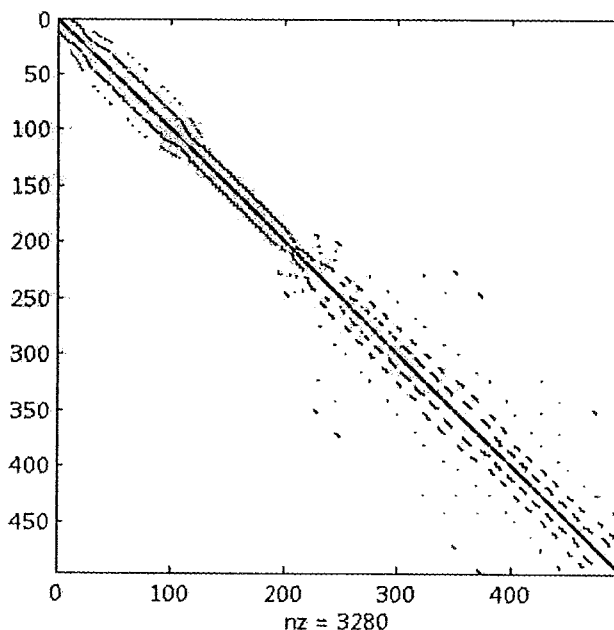
ถ้าลักษณะของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นอีลิเมนต์ย่อย n โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ เมื่อทำสำเร็จจะได้ลักษณะการวางตัวของสมาชิกที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ของระบบสมการรวมดังรูปที่ 5.12

5.3.5 กำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต

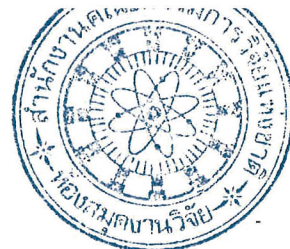
ขั้นตอนส่วนนี้จะทำหน้าที่ที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการ คือ คัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (4-12) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของตัวนำสายส่งในรูปของสนามไฟฟ้าทั้งกรณี 1 เฟสและ 3 เฟส กับโทรศัพท์มือถือที่มีการกระจายค่าสนามไฟฟ้าคงที่โดยรอบขนาด $10 \times 20 \text{ cm}^2$ (nokia3210) ดังรูปที่ 4.6(a) ในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตของระบบไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ ตามหัวข้อที่ 5.2.5 ที่ผ่านมาข้างต้น

5.3.6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย

ขั้นตอนสุดท้ายส่วนนี้จะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวมโดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน เนื่องจากเมทริกซ์มีลักษณะสมมาตรและค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ระบบสมการรวมไม่เป็นศูนย์จึงสามารถคำนวณหาค่าผลเฉลยด้วยวิธีนี้ได้ดังสมการที่ (4-17) ตามบทที่ 4 ในทำนองเดียวกับระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์



รูปที่ 5.12 ลักษณะการวางตัวของสมาชิกภายในเมทริกซ์ของระบบสมการรวม



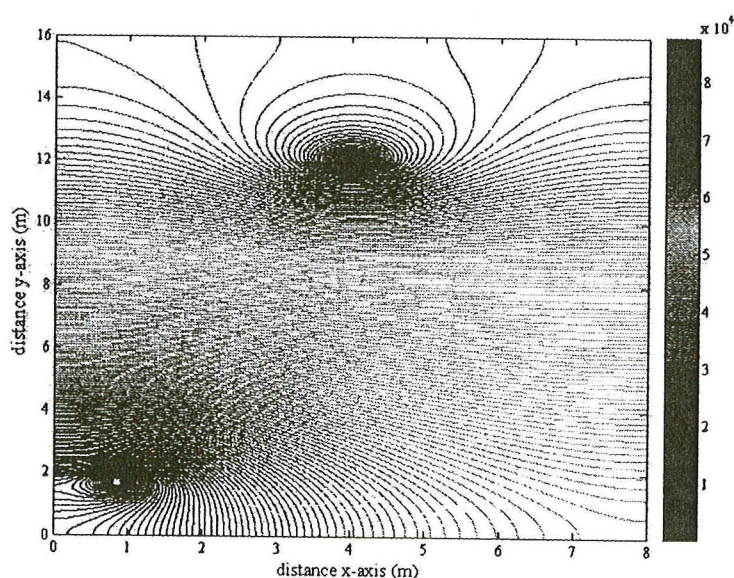
หลังจากทราบขั้นตอนและหลักการทำงานของโปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ต่อไปจะนำเสนอการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าจากระเบียบวิธีทั้ง 2 วิธี โดยทำการจำลองผลของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 220 V 22 kV และ 69 kV ส่วนระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะประกอบไปด้วยระบบไฟฟ้า ขนาด 69 kV 115 kV 230 kV และ 500 kV นอกจากนี้ในการจำลองผลของระบบแต่ละขนาดทั้งกรณี 1 เฟส และ 3 เฟส ยังทำการเลื่อนตำแหน่งของมนุษย์ ณ ระยะเวลาใช้งานโทรศัพท์มือถือในการสื่อสาร เพื่อให้เห็นลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเลื่อนตำแหน่งของมนุษย์

5.4 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 69 kV ระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV และ 500 kV ที่เกิดจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยการจำลองผลของระบบแต่ละขนาดทั้งกรณี 1 เฟส และ 3 เฟส จะทำการเลื่อนตำแหน่งของมนุษย์ ณ ระยะเวลาใช้งานโทรศัพท์มือถือ 3 ตำแหน่งด้วยกัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส และระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสตามหัวข้อต่อไปนี้

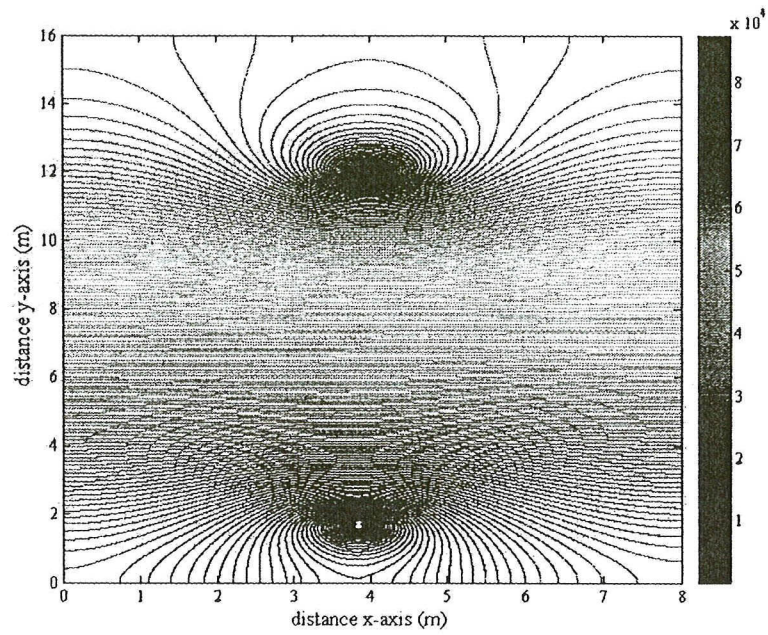
5.4.1 ระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส

- ระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV

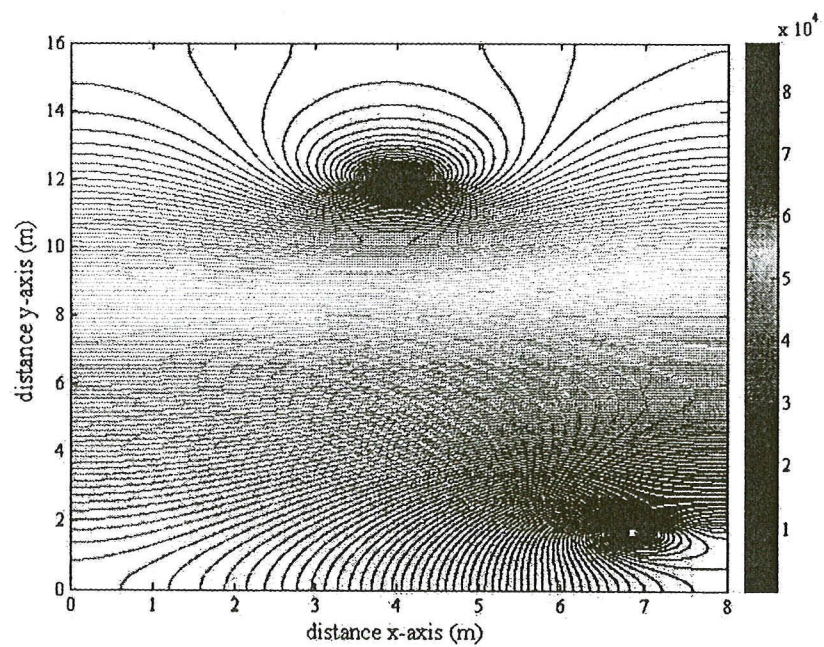


รูปที่ 5.13 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV

เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 1$ m



รูปที่ 5.14 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อนุญช์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 4$ m



รูปที่ 5.15 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อนุญช์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 7$ m

5.4.2 ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

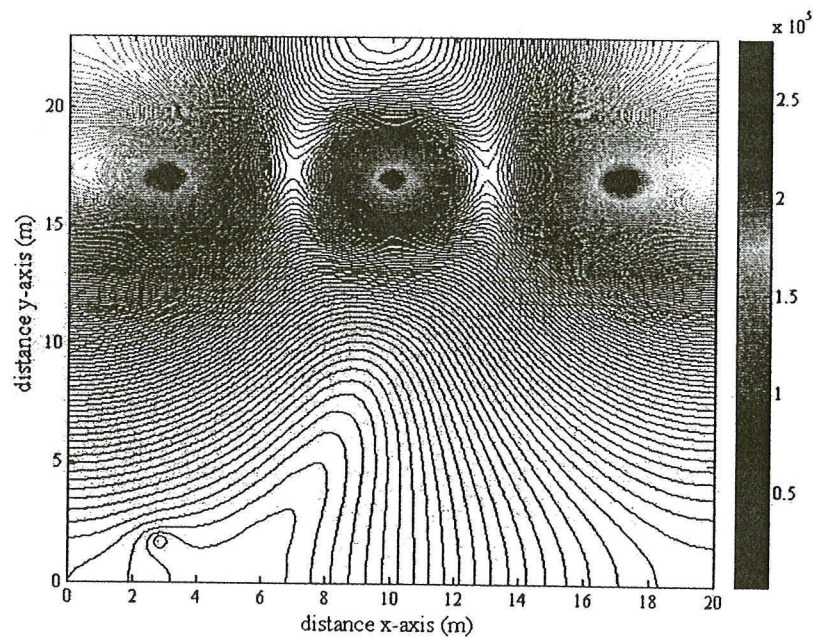
ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV เมื่อมนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใด ๆ นั้น ได้ทำการพิจารณาลักษณะของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลออกเป็น 3 กรณี คือ

$$\text{เมื่อ } V_A = 230\angle 0^\circ \text{ kV } V_B = 230\angle -120^\circ \text{ kV } V_C = 230\angle 120^\circ \text{ kV}$$

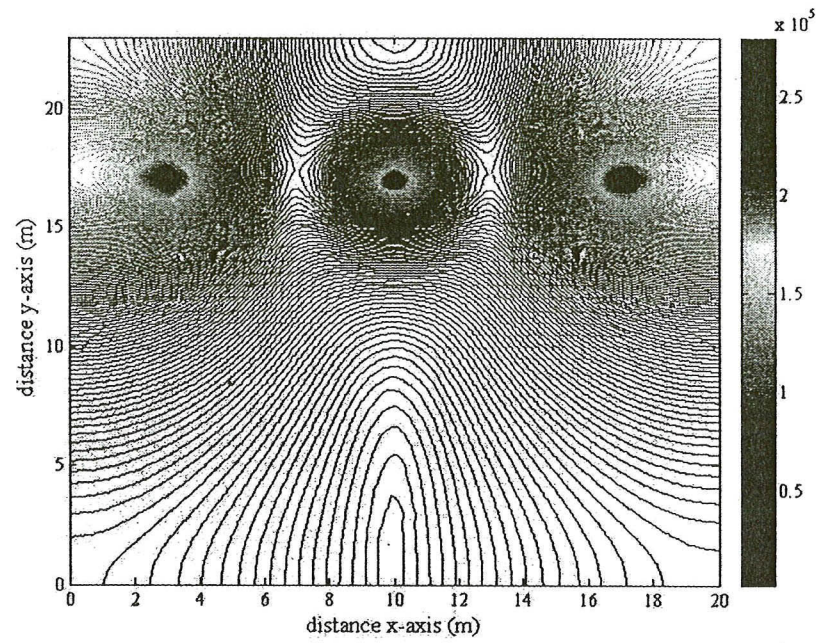
$$\text{เมื่อ } V_A = 230\angle 120^\circ \text{ kV } V_B = 230\angle 0^\circ \text{ kV } V_C = 230\angle -120^\circ \text{ kV}$$

$$\text{เมื่อ } V_A = 230\angle -120^\circ \text{ kV } V_B = 230\angle 120^\circ \text{ kV } V_C = 230\angle 0^\circ \text{ kV}$$

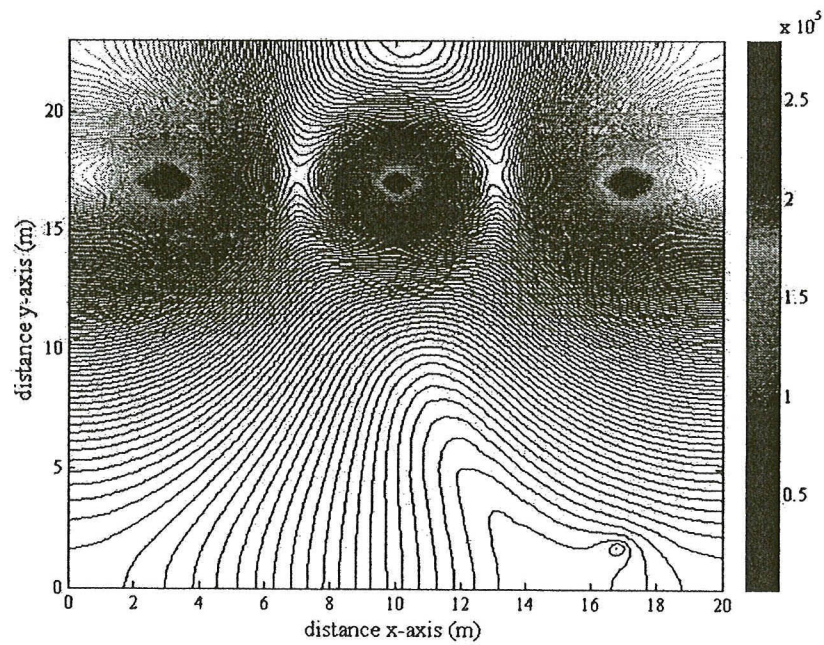
โดยลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าและคอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ทั้ง 3 กรณี จะให้ลักษณะที่เหมือนกันในทุกกรณี แม้ว่าจะพิจารณาดำแหน่งที่มนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใดก็ตาม โดยได้แสดงผลลัพธ์ในกรณีที่มนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 3 \text{ m}$, 10 m และ 17 m ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งดังกล่าว



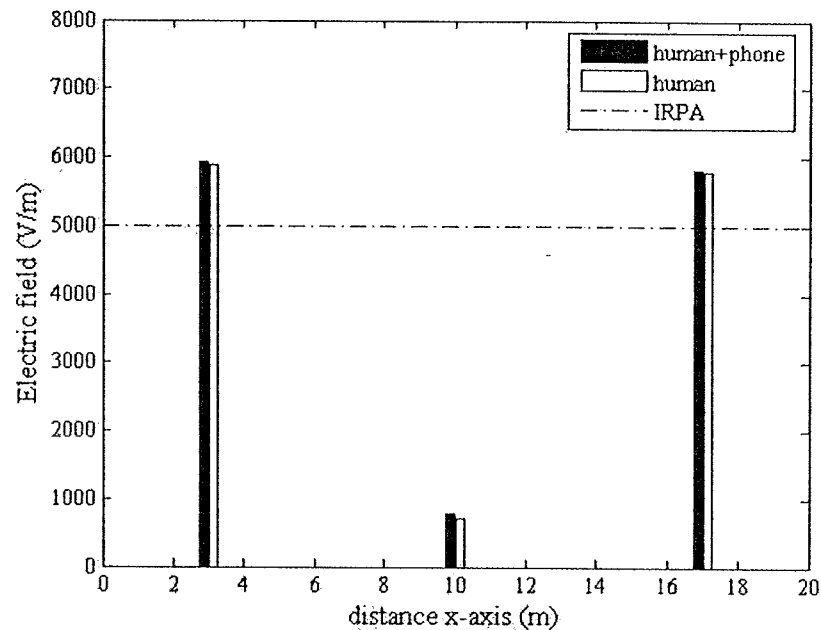
รูปที่ 5.16 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง $x = 3 \text{ m}$



รูปที่ 5.17 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



รูปที่ 5.18 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV

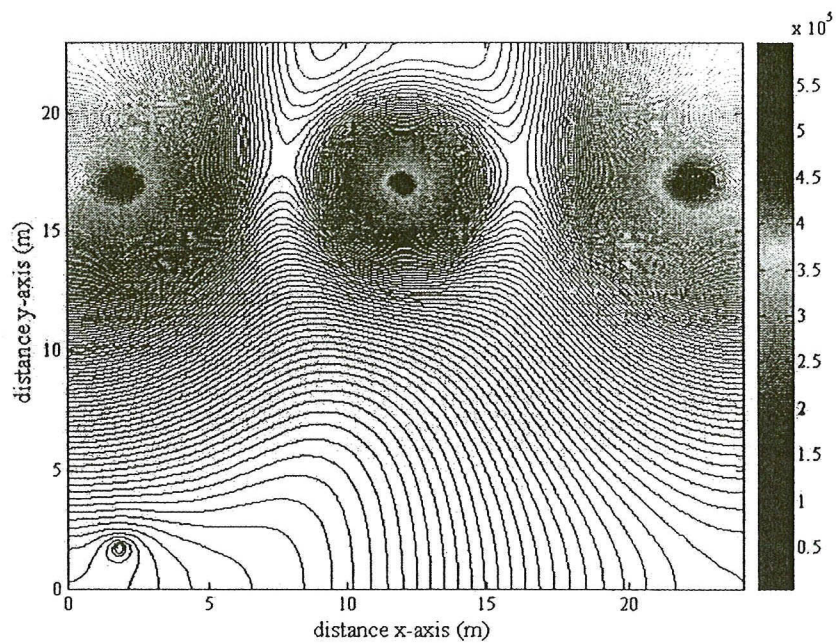
ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใด ๆ นั้น ได้ทำการพิจารณาลักษณะของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลออกเป็น 3 กรณี คือ

$$\text{เมื่อ } V_A = 500\angle 0^\circ \text{ kV } V_B = 500\angle -120^\circ \text{ kV } V_C = 500\angle 120^\circ \text{ kV}$$

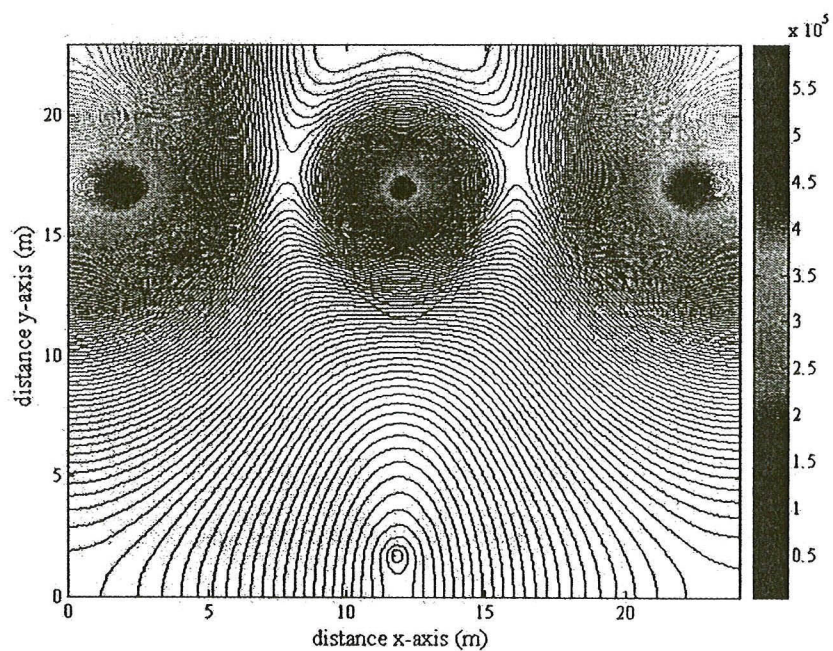
$$\text{เมื่อ } V_A = 500\angle 120^\circ \text{ kV } V_B = 500\angle 0^\circ \text{ kV } V_C = 500\angle -120^\circ \text{ kV}$$

$$\text{เมื่อ } V_A = 500\angle -120^\circ \text{ kV } V_B = 500\angle 120^\circ \text{ kV } V_C = 500\angle 0^\circ \text{ kV}$$

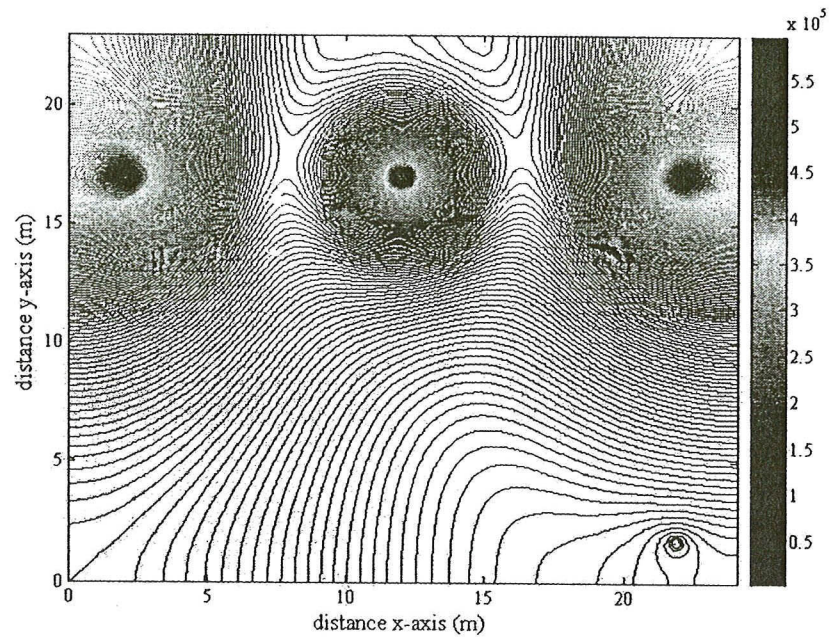
โดยลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าและคอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV ทั้ง 3 กรณี จะให้ลักษณะที่เหมือนกันในทุกกรณี แม้ว่าจะพิจารณาดำเนินที่มนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใดก็ตาม โดยได้แสดงผลลัพธ์ในกรณีที่มนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 2 \text{ m}$, 12 m และ 22 m ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งดังกล่าว



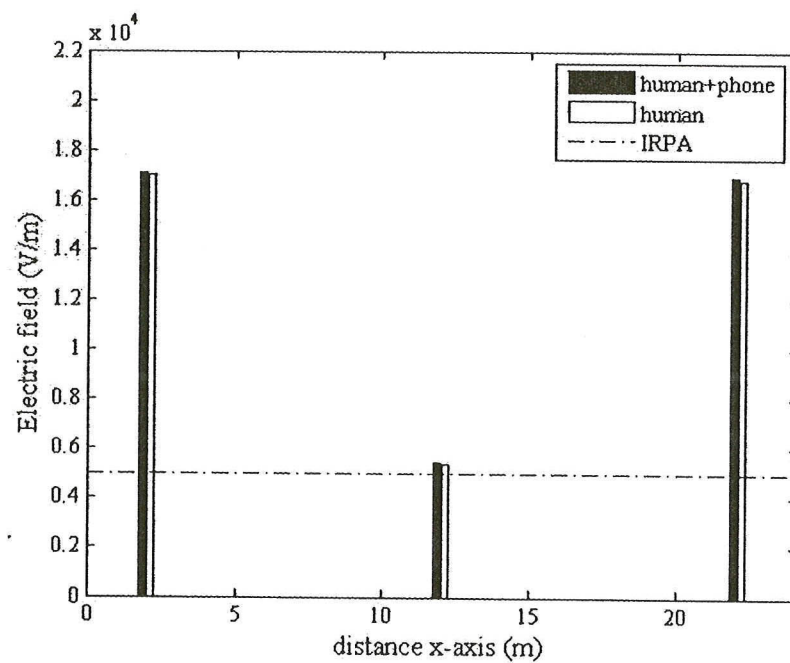
รูปที่ 5.20 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง $x = 2$ m



รูปที่ 5.21 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



รูปที่ 5.22 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลงขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง $x = 22$ m



รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลงขนาด 500 kV

5.4.3 ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลจะเลือกพิจารณาเฉพาะขนาด 230 kV เท่านั้น โดยจะแบ่งการจำลองผลออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีขนาดไม่สมดุล กับ กรณีมุมเฟสไม่สมดุล ซึ่งแต่ละกรณีจะแยกการพิจารณาออกเป็น 3 แบบ เพื่อให้เห็นผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลที่เกิดจากขนาดและมุมเฟสของแรงดันภายในสายส่ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีขนาดไม่สมดุล ($\pm 10\%$ ของขนาดเฟสอ้างอิง) ประกอบด้วยการศึกษา 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 เมื่อ $V_A = 230 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 207 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 253 \angle 120^\circ$ kV

แบบที่ 2 เมื่อ $V_A = 253 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 207 \angle 120^\circ$ kV

แบบที่ 3 เมื่อ $V_A = 207 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 253 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 120^\circ$ kV

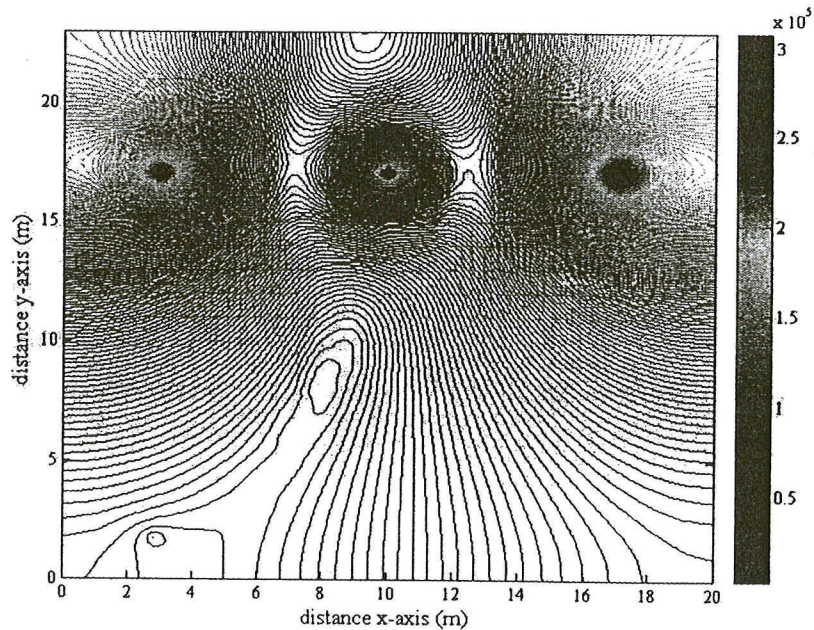
กรณีมุมเฟสไม่สมดุล ($\pm 30^\circ$ ของมุมเฟสอ้างอิง) ประกอบด้วยการศึกษา 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 เมื่อ $V_A = 230 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -150^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 150^\circ$ kV

แบบที่ 2 เมื่อ $V_A = 230 \angle 30^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 90^\circ$ kV

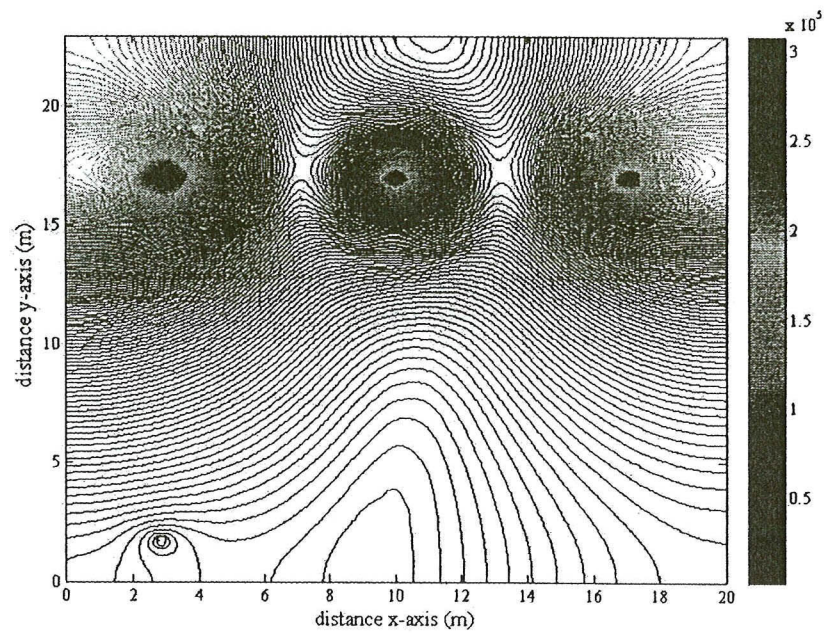
แบบที่ 3 เมื่อ $V_A = 230 \angle -30^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -90^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 120^\circ$ kV

- กรณีขนาดไม่สมดุล ($\pm 10\%$ ของขนาดเฟสอ้างอิง)



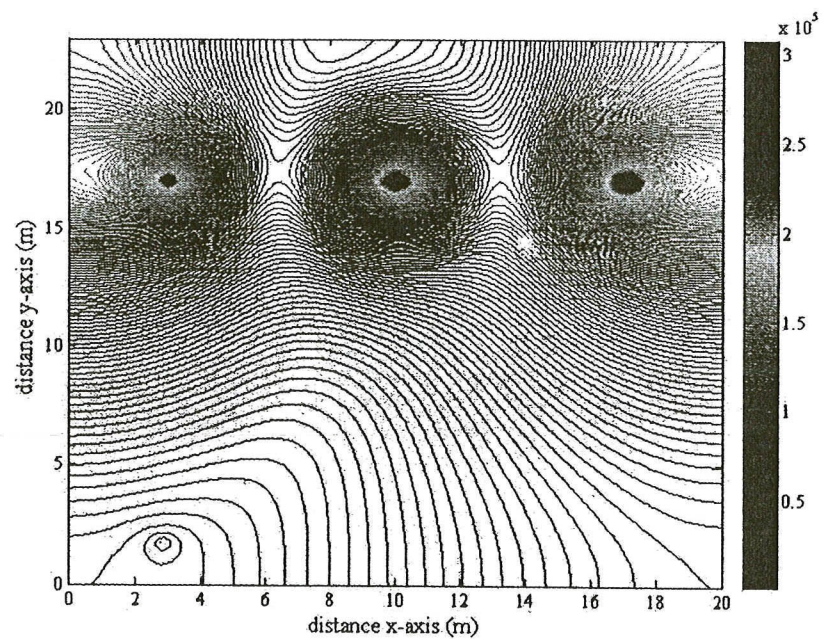
รูปที่ 5.24 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ

$$V_A = 230 \angle 0^\circ \text{ kV } V_B = 207 \angle -120^\circ \text{ kV } V_C = 253 \angle 120^\circ \text{ kV ณ ตำแหน่ง } x = 3 \text{ m}$$



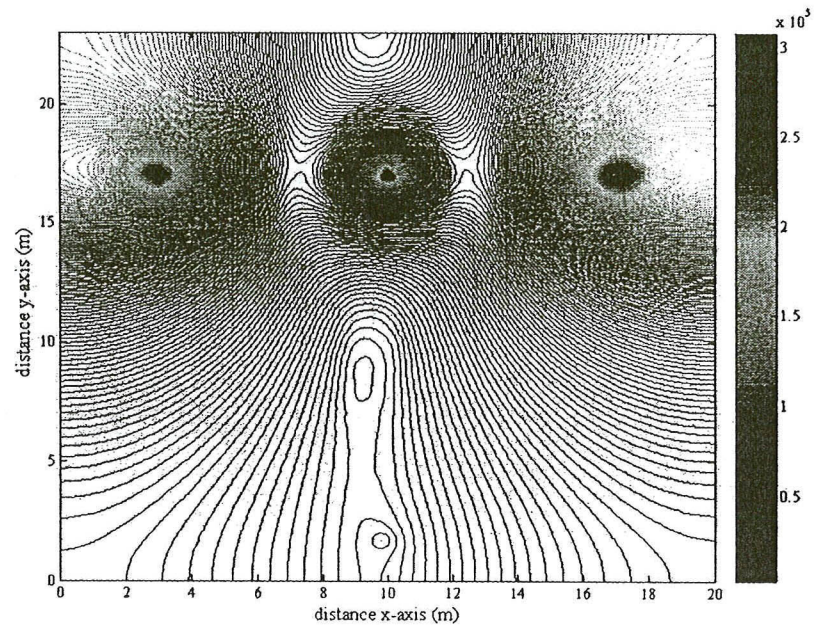
รูปที่ 5.25 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ

$$V_A = 253 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad V_B = 230 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad V_C = 207 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad \text{ณ ตำแหน่ง } x = 3 \text{ m}$$

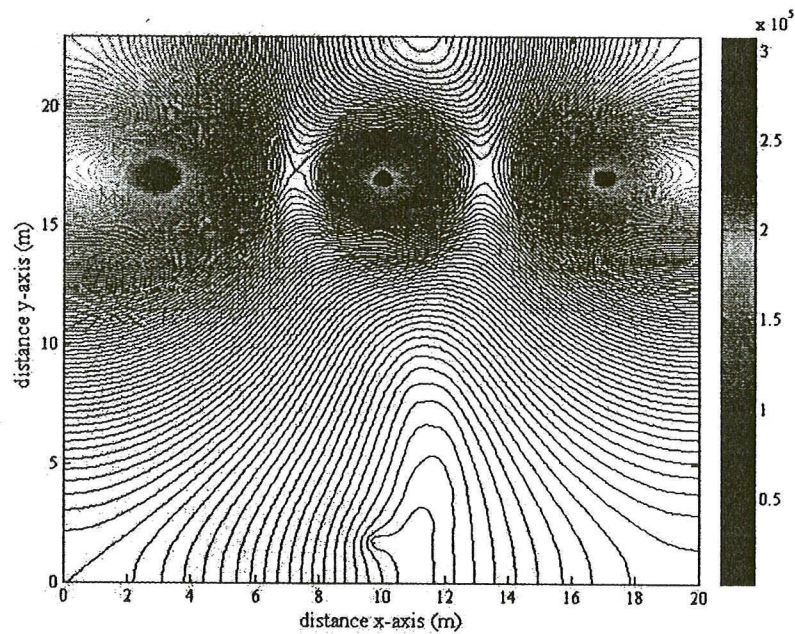


รูปที่ 5.26 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ

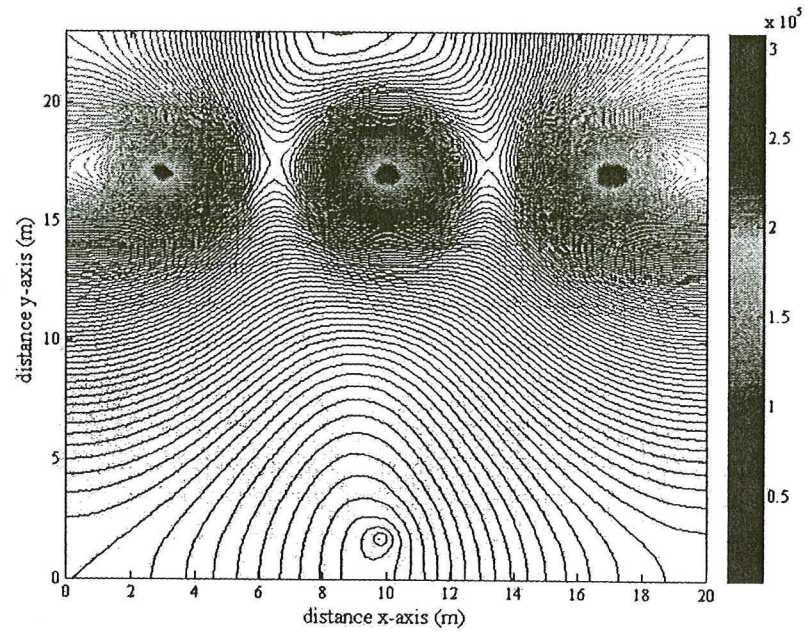
$$V_A = 207 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad V_B = 253 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad V_C = 230 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad \text{ณ ตำแหน่ง } x = 3 \text{ m}$$



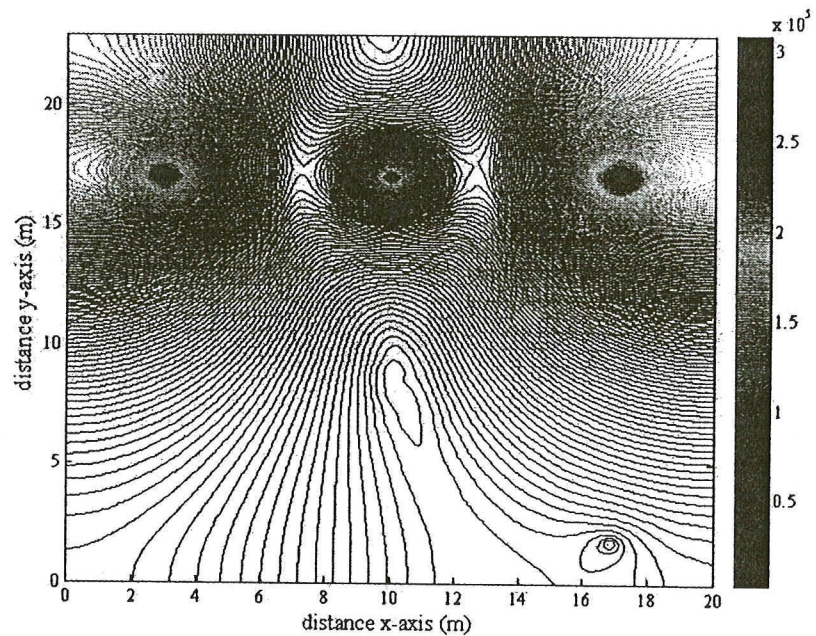
รูปที่ 5.27 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x=10$ m



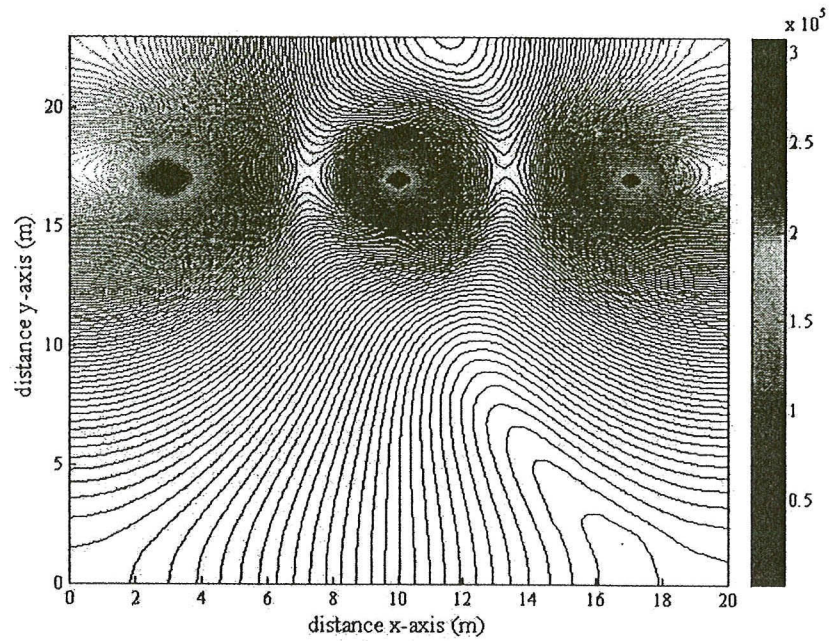
รูปที่ 5.28 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x=10$ m



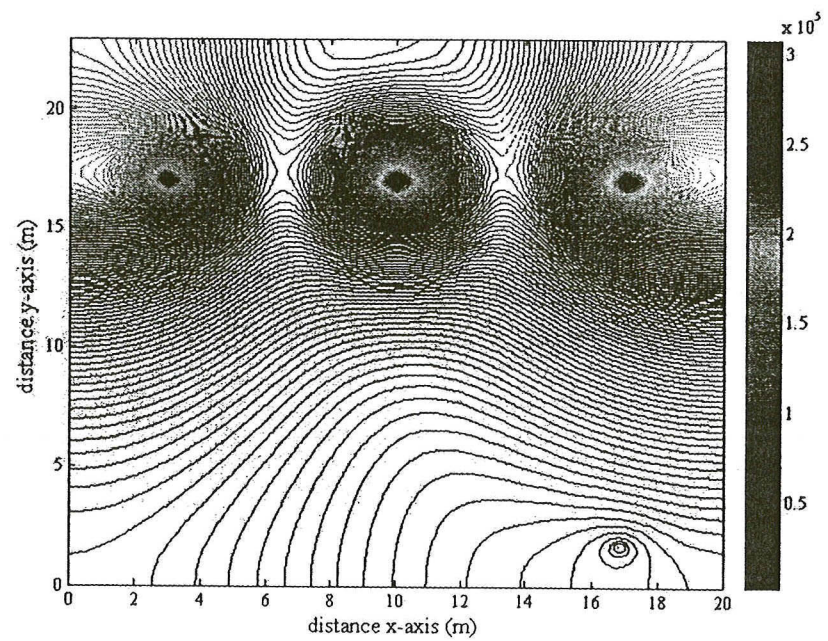
รูปที่ 5.29 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x=10$ m



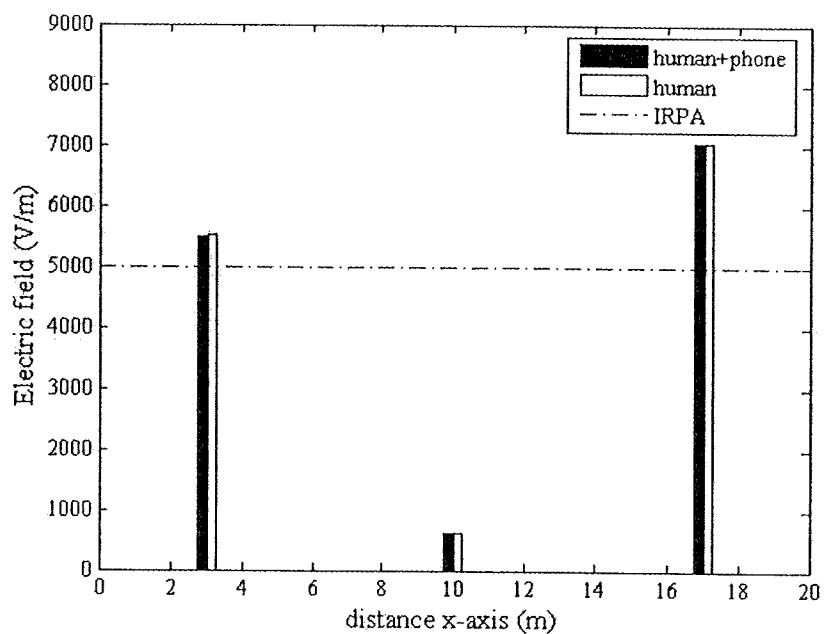
รูปที่ 5.30 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x=17$ m



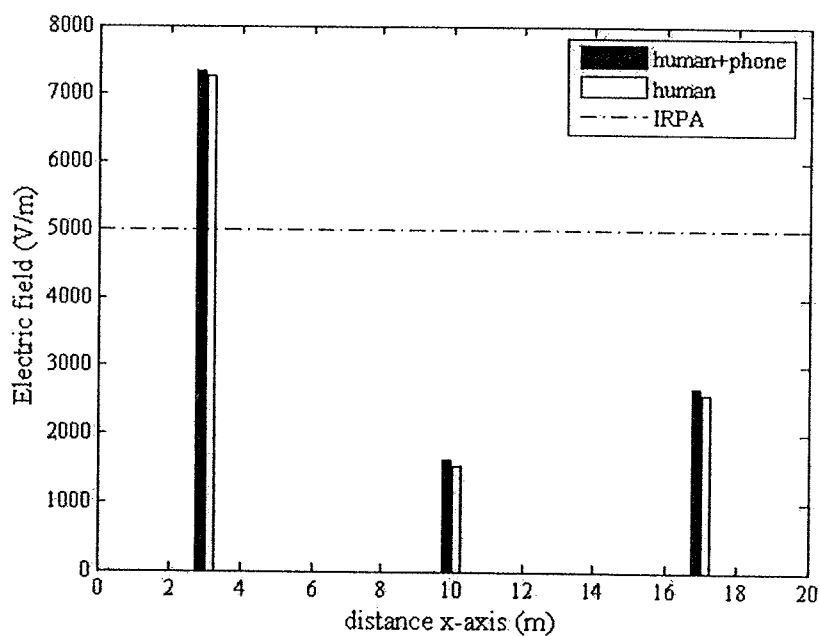
รูปที่ 5.31 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ
 $V_A = 253 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 207 \angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



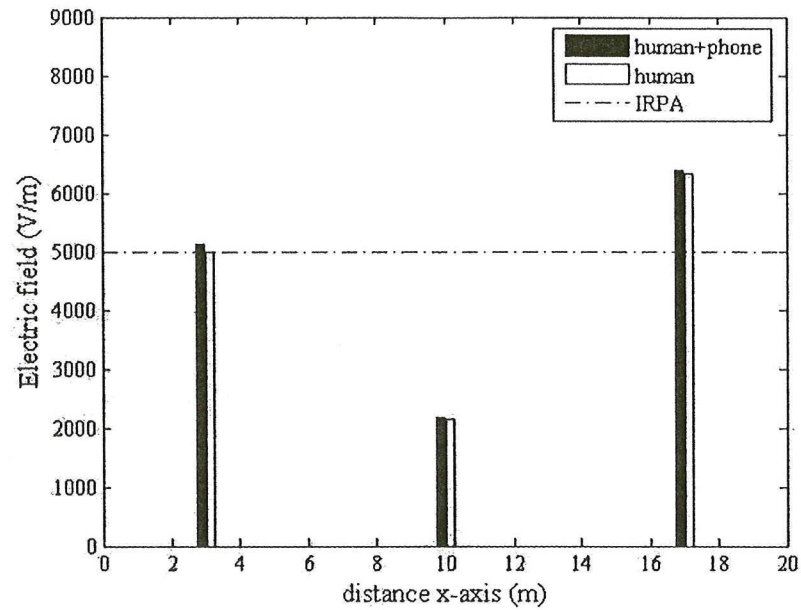
รูปที่ 5.32 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ
 $V_A = 207 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 253 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



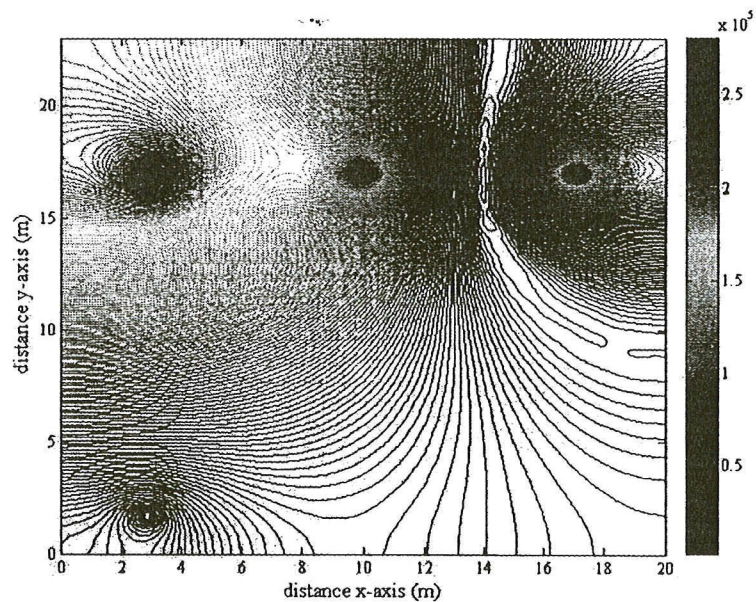
รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 1



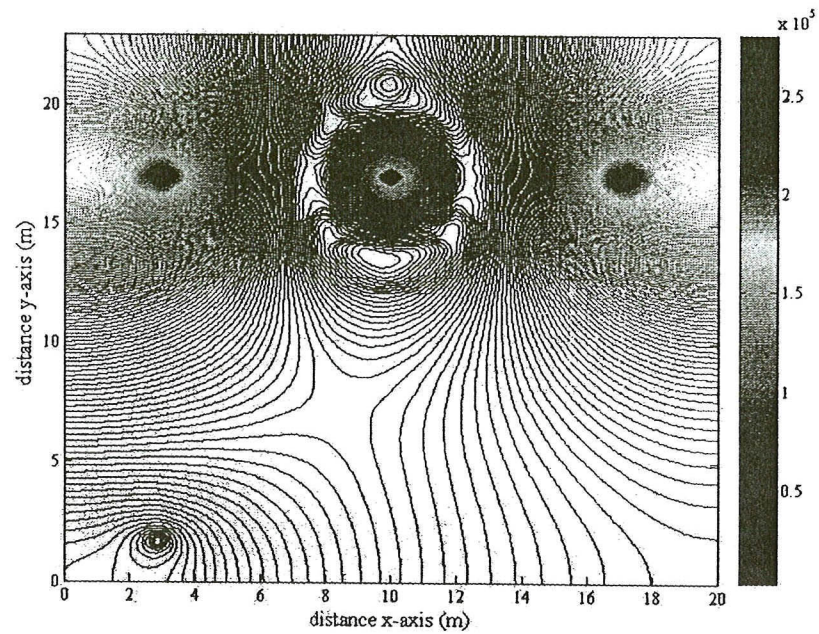
รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 2



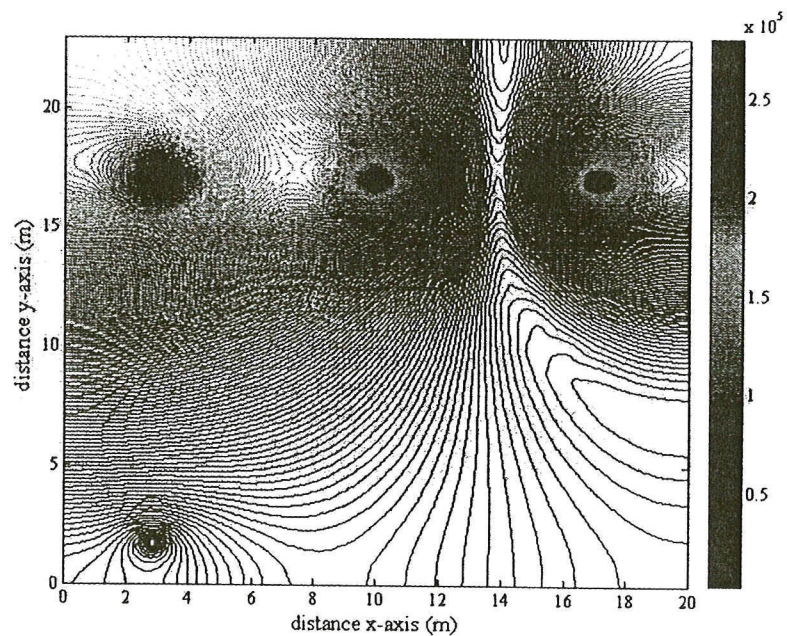
รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 3 - กรณีมุมเฟสไม่สมดุล ($\pm 30^\circ$ ของมุมเฟสอ้างอิง)



รูปที่ 5.36 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -150^\circ$ kV $V_C = 230\angle 150^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 3$ m

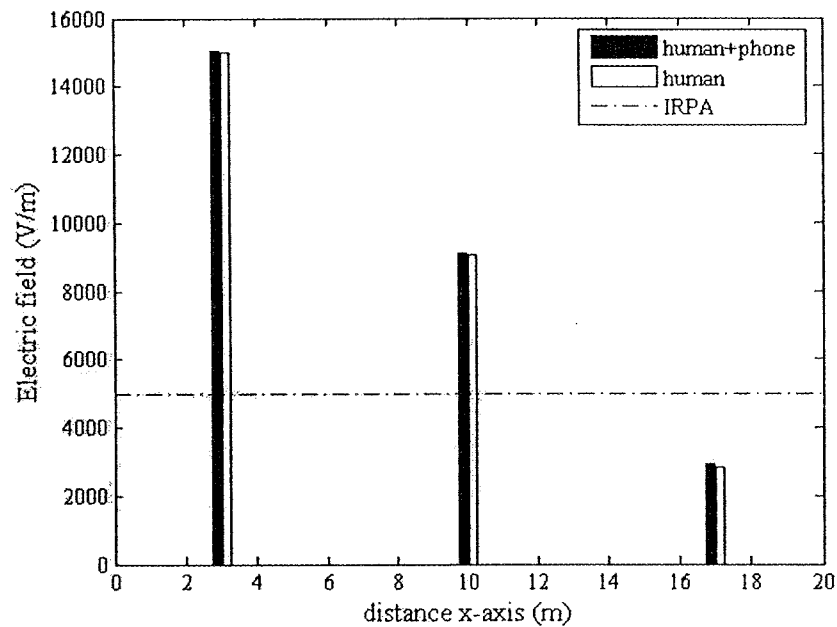


รูปที่ 5.37 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 90^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 3$ m

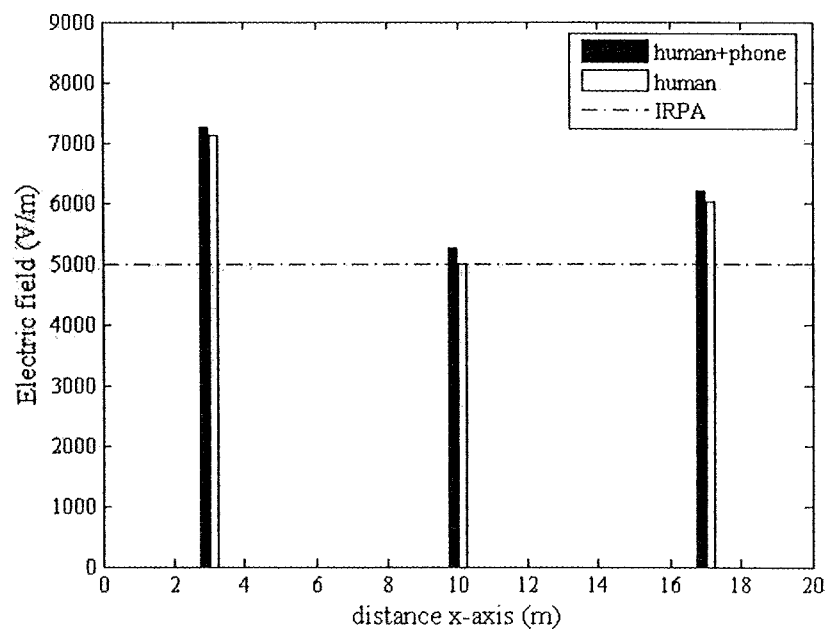


รูปที่ 5.38 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle -30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -90^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 3$ m

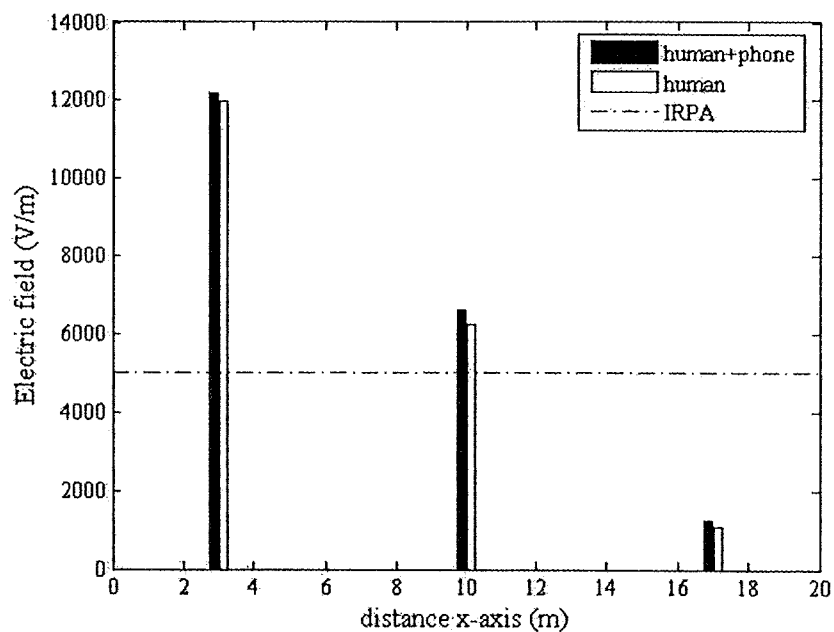
ส่วนการกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m และ 17 m จะมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกันกับ เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่ง $x = 3$ m ที่ผ่านมาทุกประการ โดยจะมีความแตกต่างกันตรงขนาดเท่านั้น จึงไม่ขอนำเสนอในที่นี้ แต่ได้แสดงเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งดังกล่าวได้ดังรูป



รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 1



รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 2



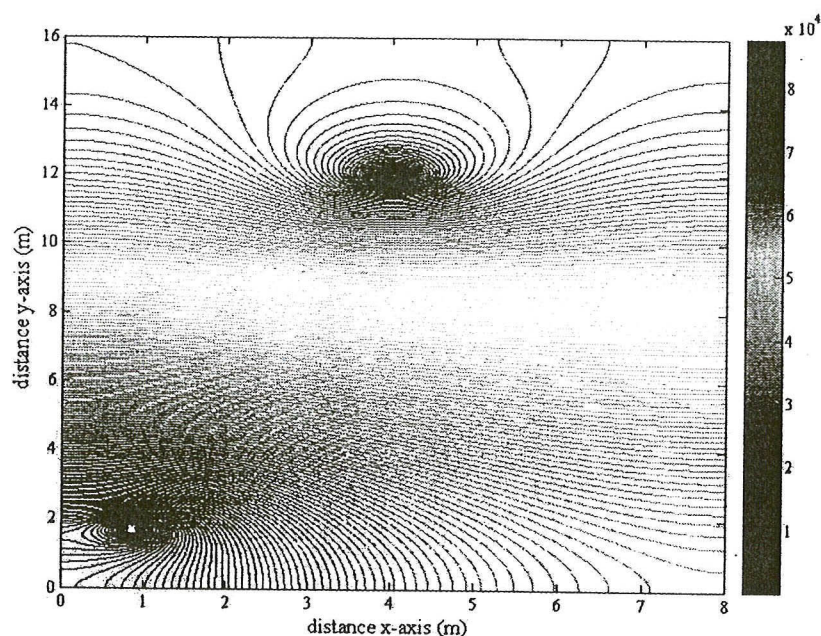
รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 3

5.5 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะทำการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้าทั้งระบบ 1 เฟส และ 3 เฟส พร้อมทั้งทำการเลื่อนตำแหน่งของมนุษย์ ณ ขณะใช้งาน โทรศัพท์มือถือ 3 ตำแหน่ง เหมือนในทำนองเดียวกับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านมา เพื่อให้เห็นความแตกต่างของลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส และระบบไฟฟ้า 3 เฟสตามหัวข้อต่อไปนี้

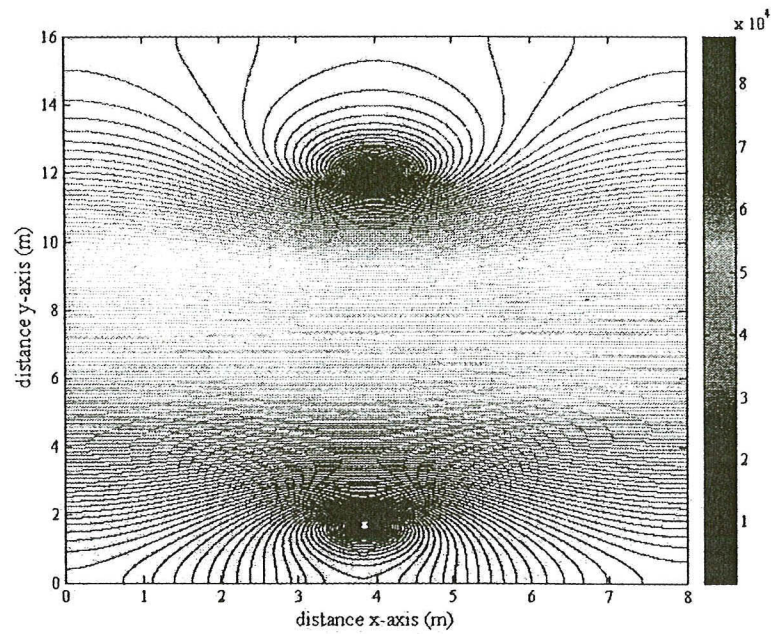
5.5.1 ระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟส

- ระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV

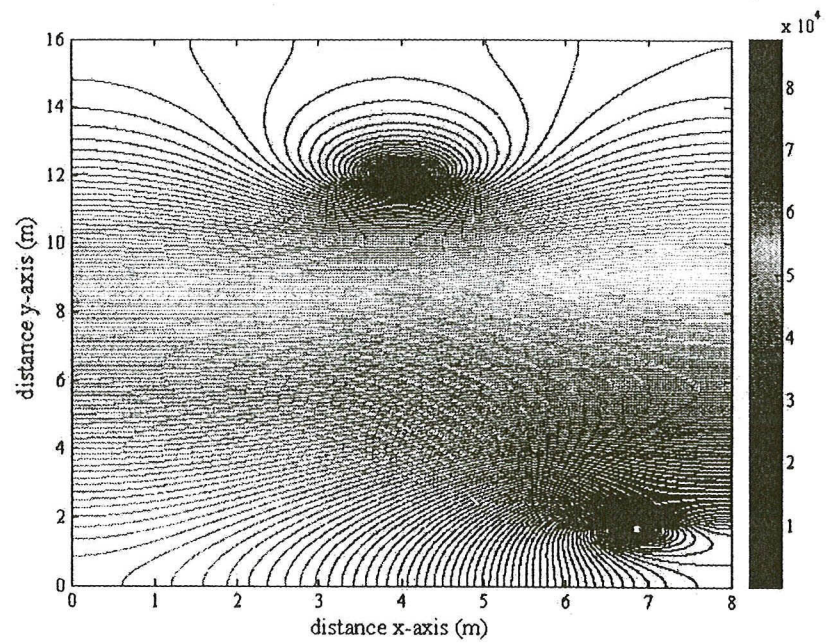


รูปที่ 5.42 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV

เมื่อมนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 1$ m



รูปที่ 5.43 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อนุญช์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 4$ m



รูปที่ 5.44 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV
เมื่อนุญช์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 7$ m

5.5.2 ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

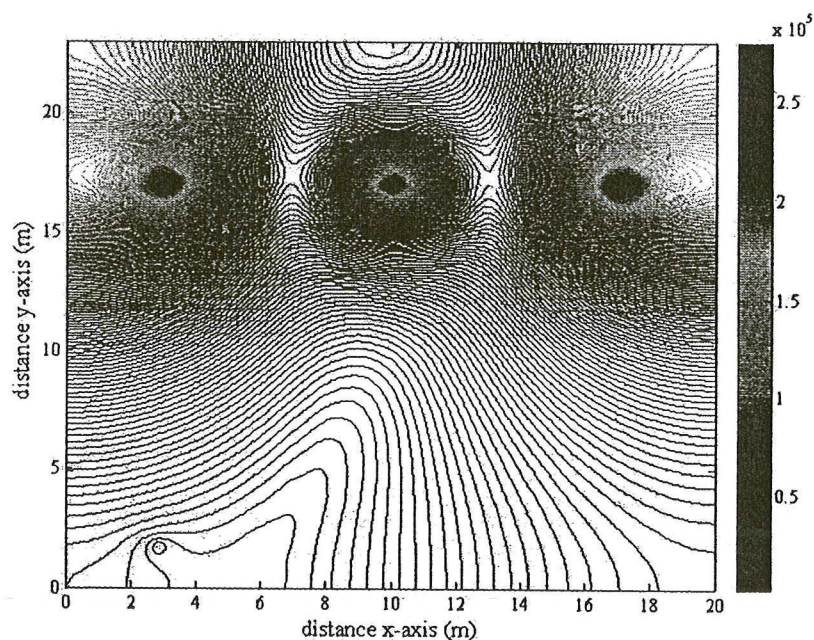
ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใด ๆ นั้น ได้ทำการพิจารณาลักษณะของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลออกเป็น 3 กรณี คือ

$$\text{เมื่อ } V_A = 230\angle 0^\circ \text{ kV } V_B = 230\angle -120^\circ \text{ kV } V_C = 230\angle 120^\circ \text{ kV}$$

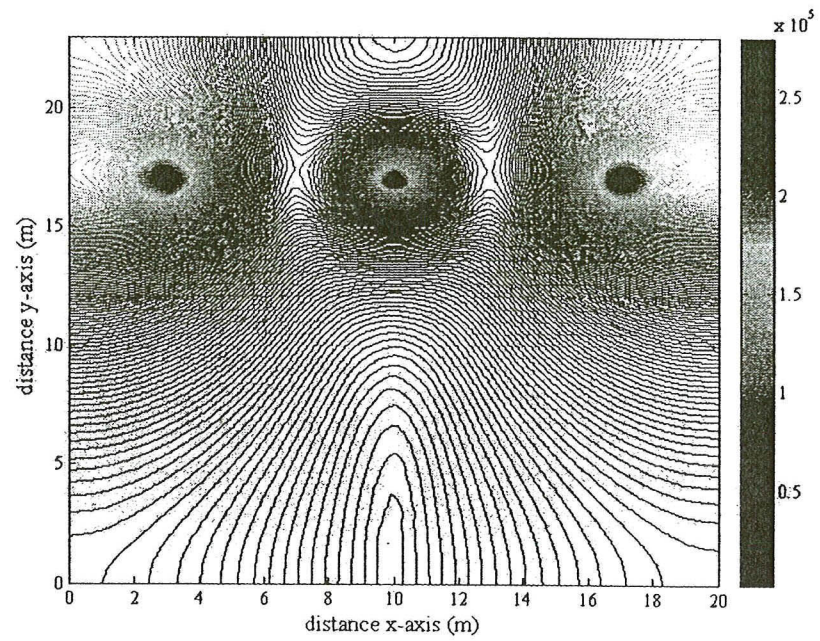
$$\text{เมื่อ } V_A = 230\angle 120^\circ \text{ kV } V_B = 230\angle 0^\circ \text{ kV } V_C = 230\angle -120^\circ \text{ kV}$$

$$\text{เมื่อ } V_A = 230\angle -120^\circ \text{ kV } V_B = 230\angle 120^\circ \text{ kV } V_C = 230\angle 0^\circ \text{ kV}$$

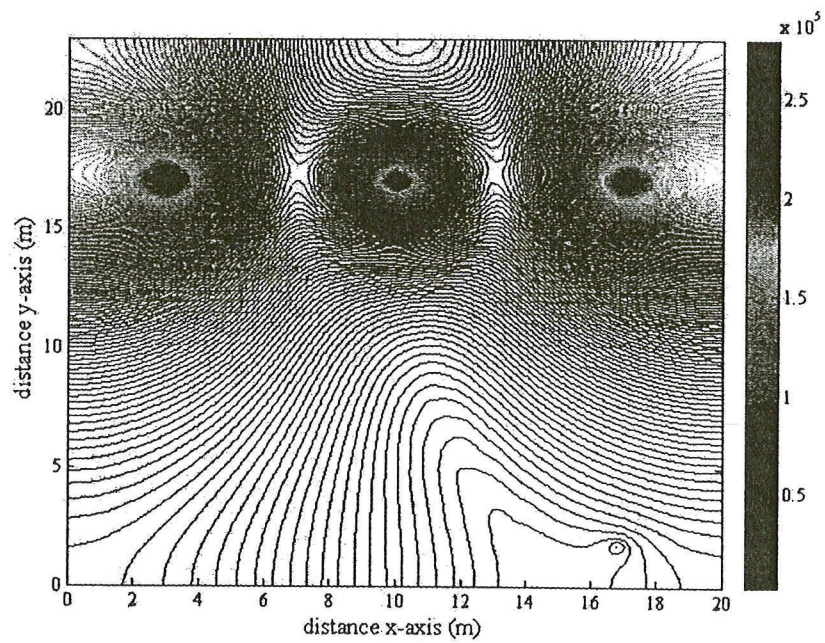
โดยลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าและคอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ทั้ง 3 กรณี จะให้ลักษณะที่เหมือนกันในทุกกรณี แม้ว่าจะพิจารณาดำแหน่งที่มนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใดก็ตาม โดยได้แสดงผลลัพธ์ในกรณีที่มนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 3 \text{ m}$, 10 m และ 17 m ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งดังกล่าว



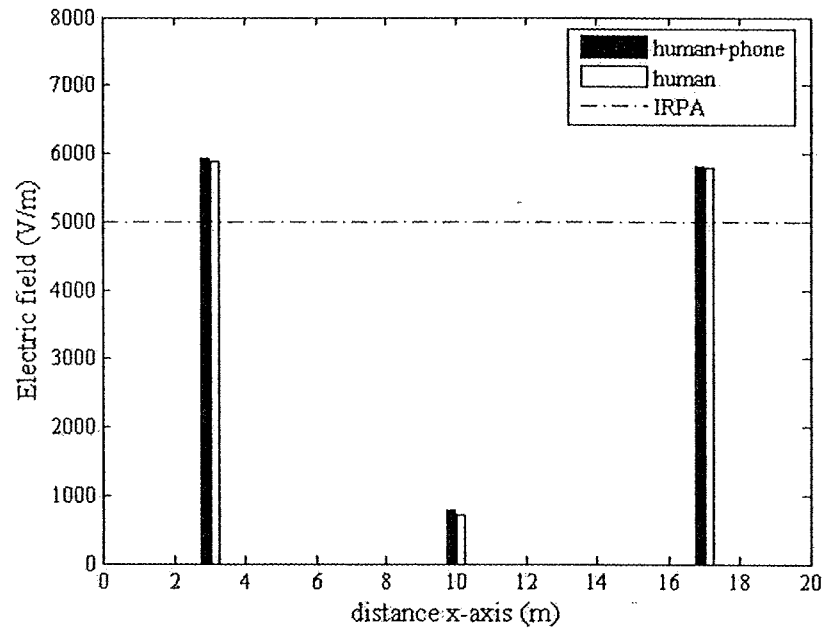
รูปที่ 5.45 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 230 kV ณ ตำแหน่ง $x = 3 \text{ m}$



รูปที่ 5.46 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 230 kV
ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



รูปที่ 5.47 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 230 kV
ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



รูปที่ 5.48 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ

ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลงาน 230 kV

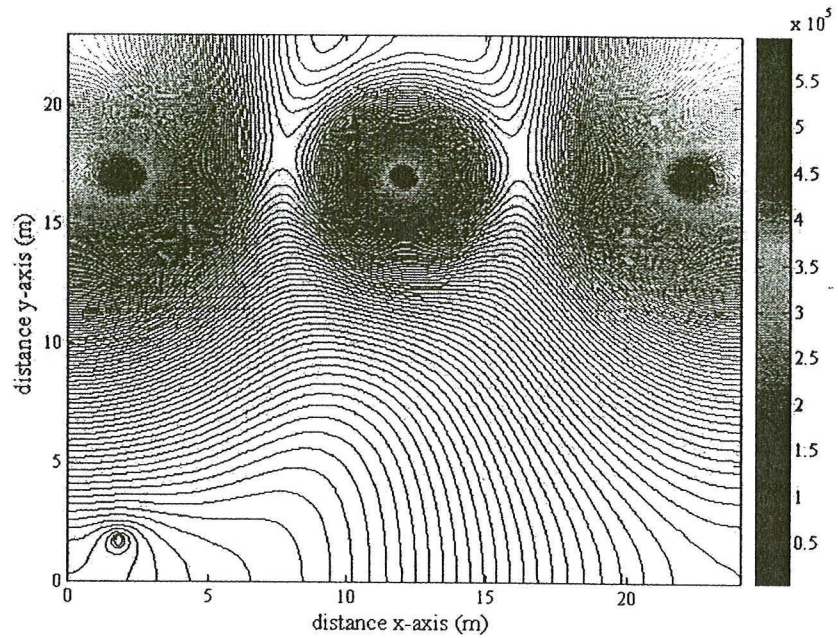
ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV เมื่อมนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใด ๆ นั้น ได้ทำการพิจารณาลักษณะของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุสออกเป็น 3 กรณี คือ

$$\text{เมื่อ } V_A = 500 \angle 0^\circ \text{ kV } V_B = 500 \angle -120^\circ \text{ kV } V_C = 500 \angle 120^\circ \text{ kV}$$

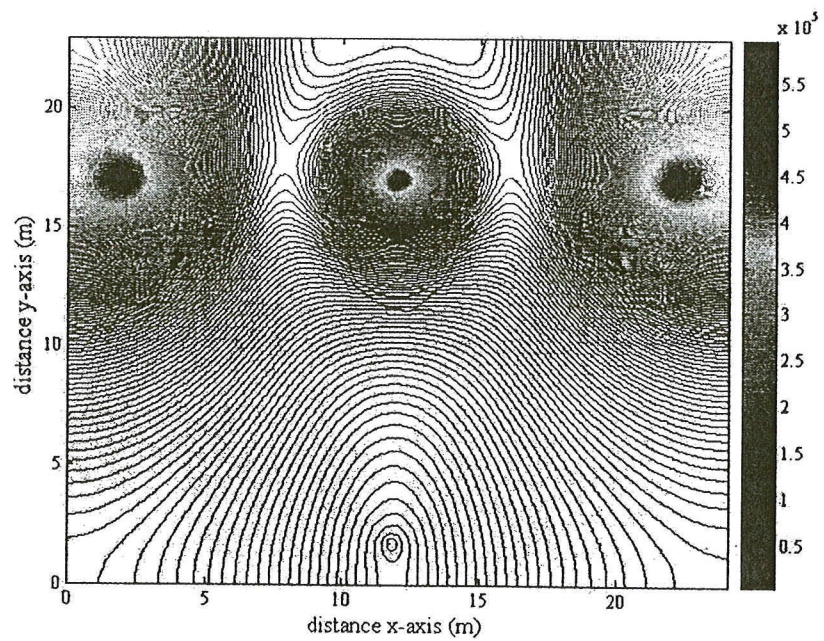
$$\text{เมื่อ } V_A = 500 \angle 120^\circ \text{ kV } V_B = 500 \angle 0^\circ \text{ kV } V_C = 500 \angle -120^\circ \text{ kV}$$

$$\text{เมื่อ } V_A = 500 \angle -120^\circ \text{ kV } V_B = 500 \angle 120^\circ \text{ kV } V_C = 500 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

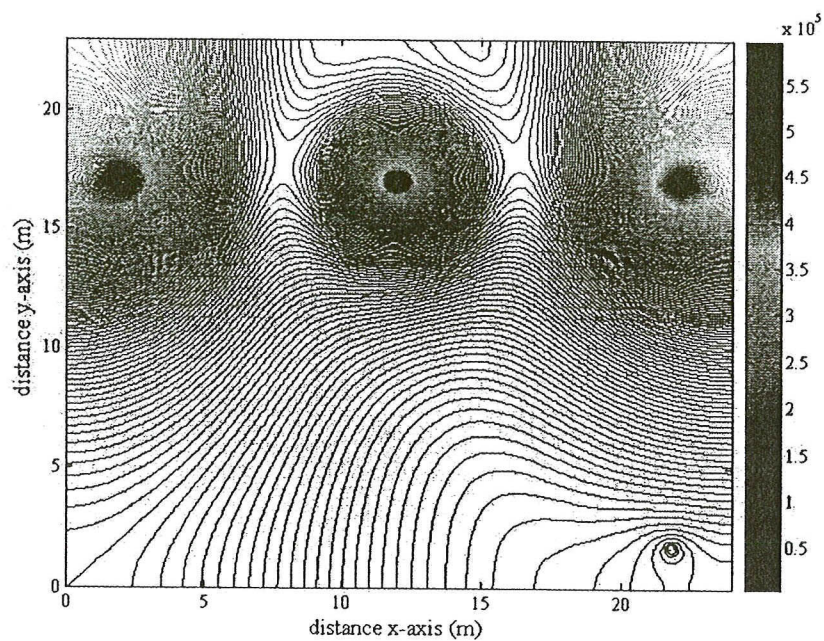
โดยลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้าและคอนทัวร์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 500 kV ทั้ง 3 กรณี จะให้ลักษณะที่เหมือนกันในทุกกรณี แม้ว่าจะพิจารณาดำเนินที่มนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งใดก็ตาม โดยได้แสดงผลลัพธ์ในกรณีที่มนุษย์ใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 2 \text{ m}$, 12 m และ 22 m ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งาน โทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งดังกล่าว



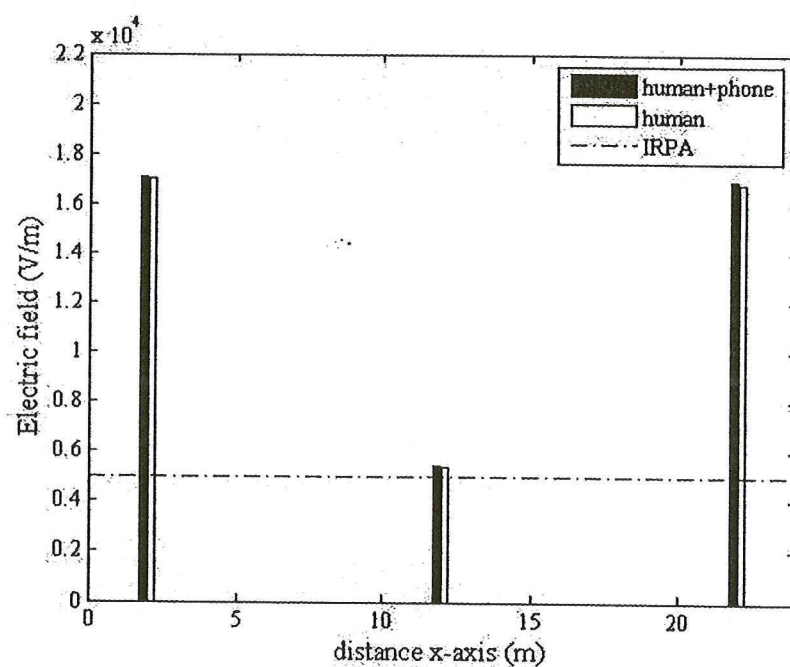
รูปที่ 5.49 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 500 kV
ณ ตำแหน่ง $x = 2$ m



รูปที่ 5.50 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 500 kV
ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



รูปที่ 5.51 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 500 kV ณ ตำแหน่ง $x = 22$ m



รูปที่ 5.52 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลขนาด 500 kV

5.5.3 ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลจะเลือกพิจารณาเฉพาะขนาด 230 kV เท่านั้น โดยจะแบ่งการจำลองผลออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีขนาดไม่สมดุล กับ กรณีมุมเฟสไม่สมดุล ซึ่งแต่ละกรณีจะแยกการพิจารณาออกเป็น 3 แบบ เพื่อให้เห็นผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลที่เกิดจากขนาดและมุมเฟสของแรงดันภายในสายส่ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีขนาดไม่สมดุล ($\pm 10\%$ ของขนาดเฟสอ้างอิง) ประกอบด้วยการศึกษา 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 เมื่อ $V_A = 230 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 207 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 253 \angle 120^\circ$ kV

แบบที่ 2 เมื่อ $V_A = 253 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 207 \angle 120^\circ$ kV

แบบที่ 3 เมื่อ $V_A = 207 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 253 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 120^\circ$ kV

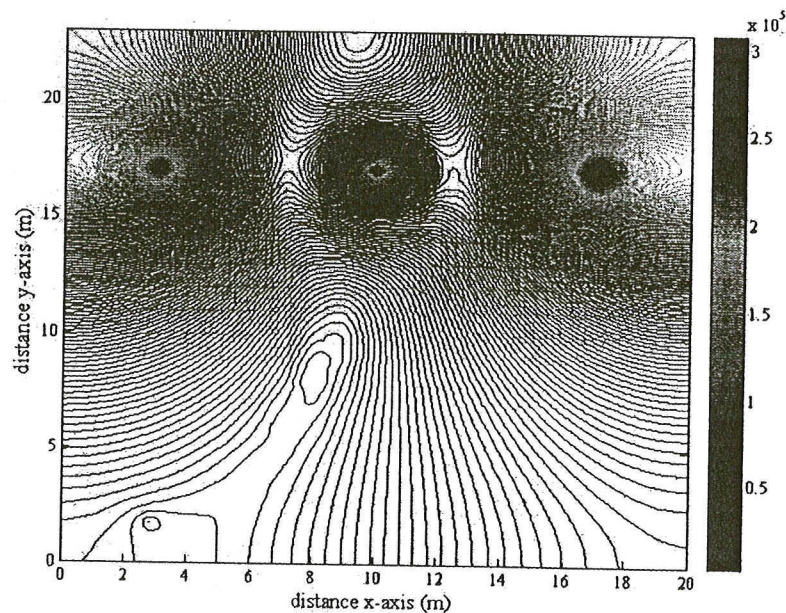
กรณีมุมเฟสไม่สมดุล ($\pm 30^\circ$ ของมุมเฟสอ้างอิง) ประกอบด้วยการศึกษา 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 เมื่อ $V_A = 230 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -150^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 150^\circ$ kV

แบบที่ 2 เมื่อ $V_A = 230 \angle 30^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 90^\circ$ kV

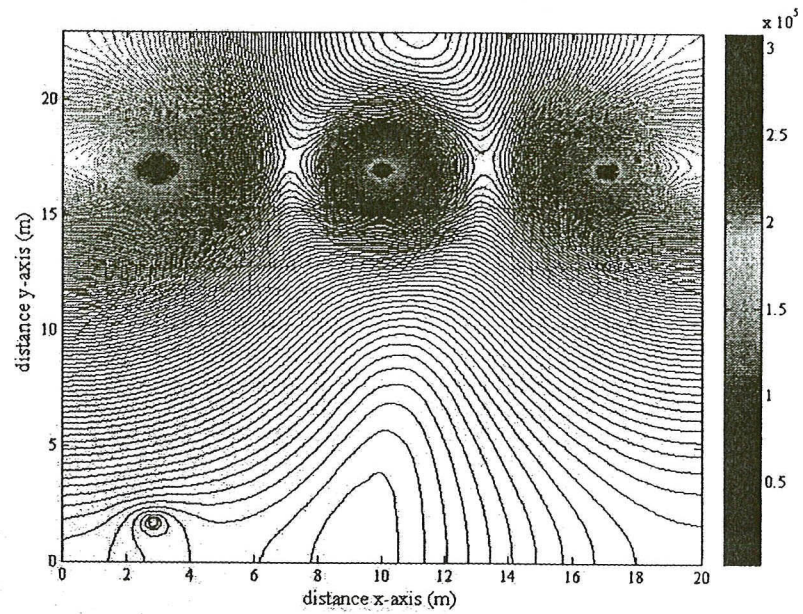
แบบที่ 3 เมื่อ $V_A = 230 \angle -30^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -90^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 120^\circ$

- กรณีขนาดไม่สมดุล ($\pm 10\%$ ของขนาดเฟสอ้างอิง)



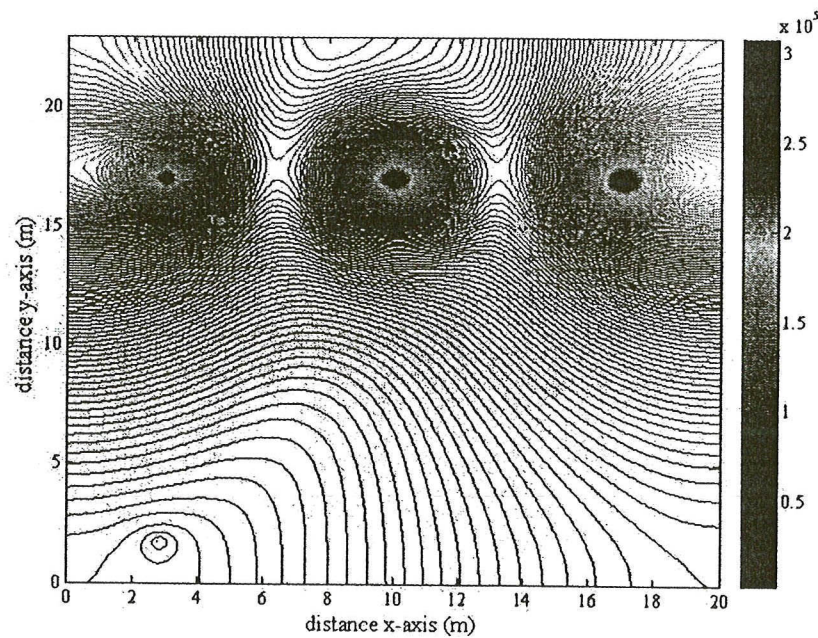
รูปที่ 5.53 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ

$$V_A = 230 \angle 0^\circ \text{ kV } V_B = 207 \angle -120^\circ \text{ kV } V_C = 253 \angle 120^\circ \text{ kV ณ ตำแหน่ง } x = 3 \text{ m}$$



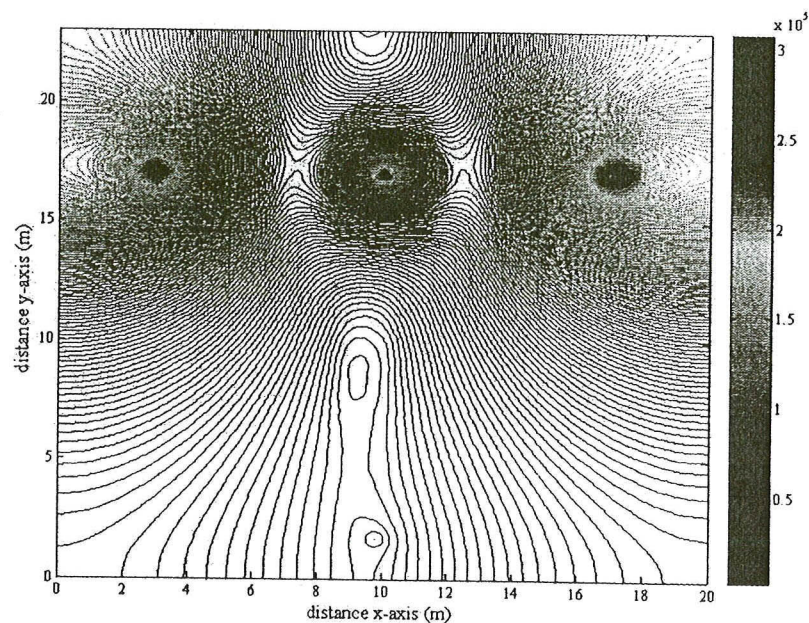
รูปที่ 5.54 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ

$$V_A = 253 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad V_B = 230 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad V_C = 207 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad \text{ณ ตำแหน่ง } x = 3 \text{ m}$$

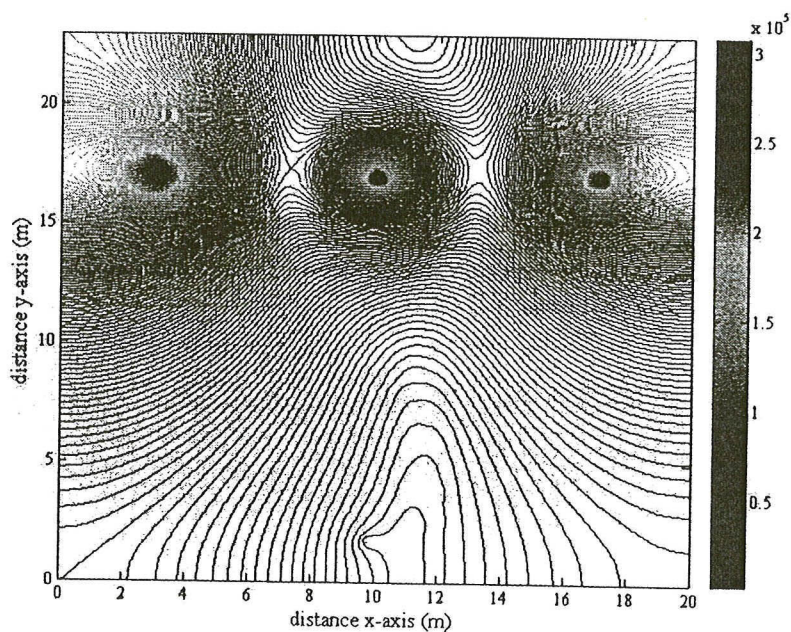


รูปที่ 5.55 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ

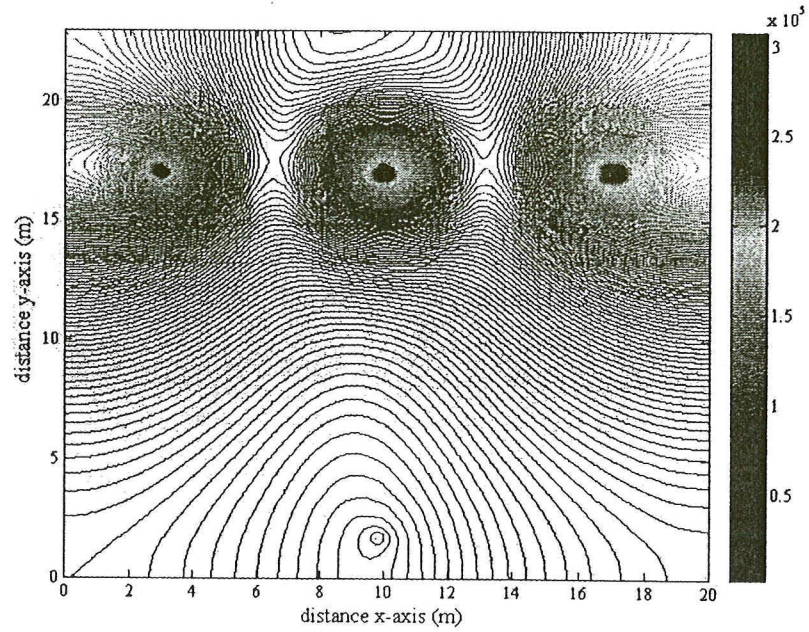
$$V_A = 207 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad V_B = 253 \angle -120^\circ \text{ kV} \quad V_C = 230 \angle 120^\circ \text{ kV} \quad \text{ณ ตำแหน่ง } x = 3 \text{ m}$$



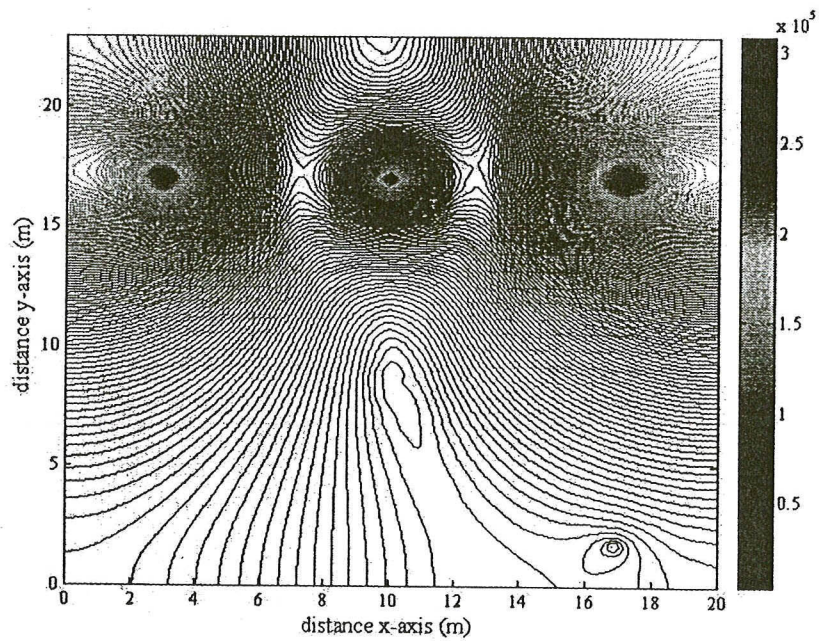
รูปที่ 5.56 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



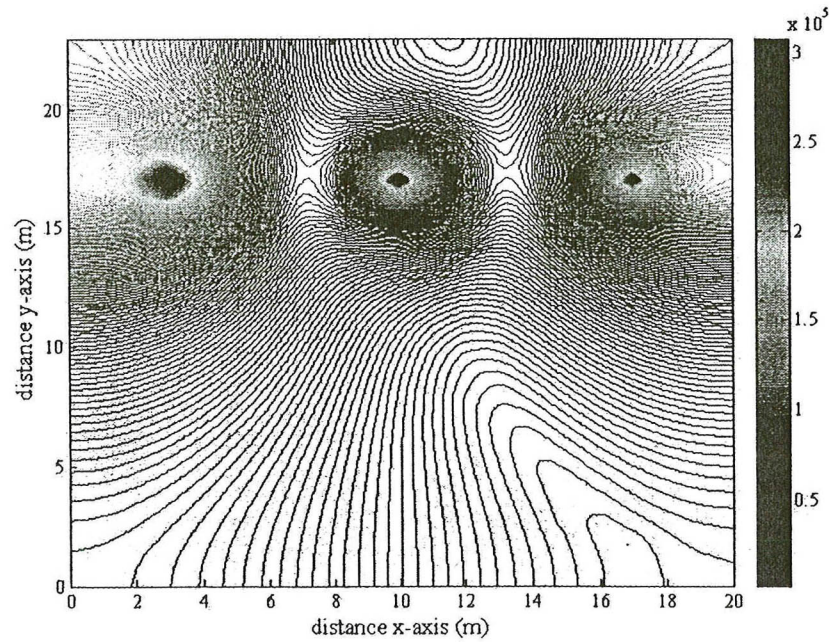
รูปที่ 5.57 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 207\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



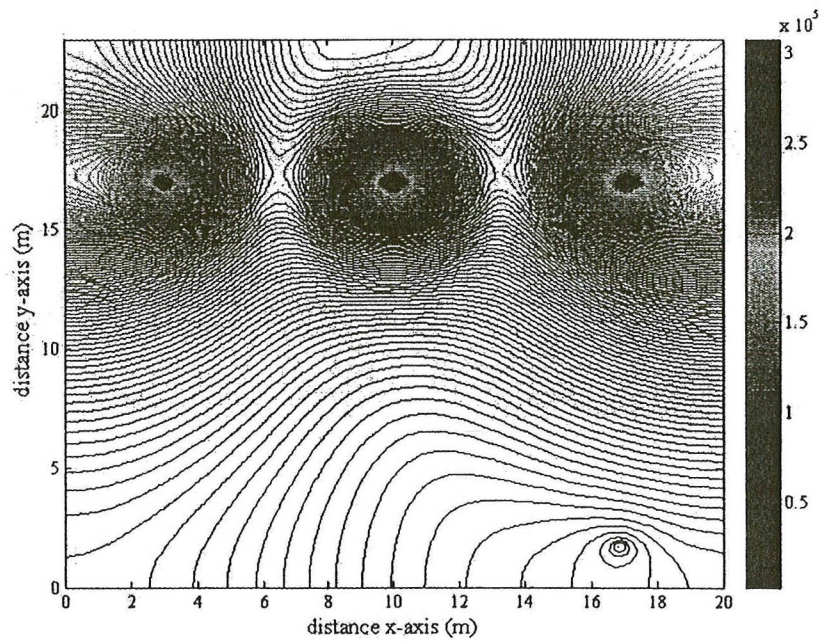
รูปที่ 5.58 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ
 $V_A = 207\angle 0^\circ$ kV $V_B = 253\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m



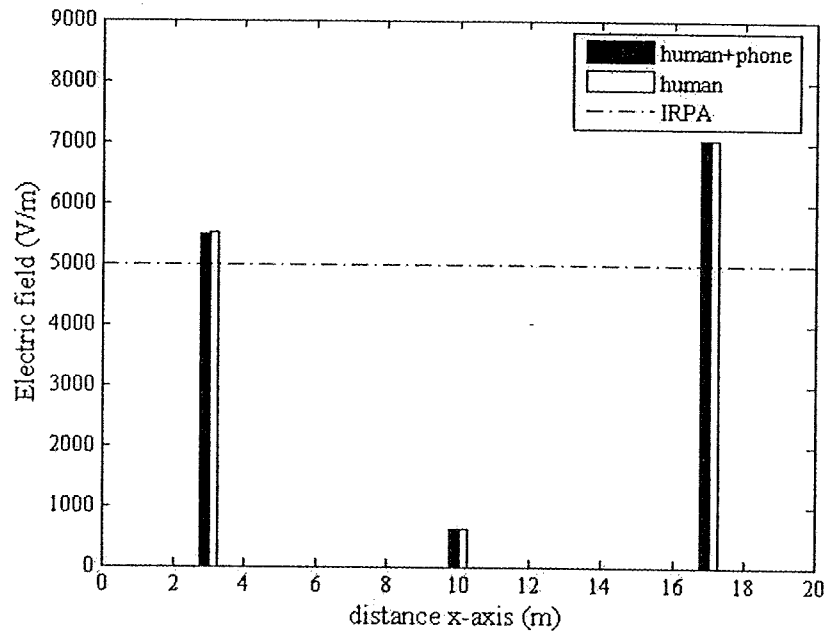
รูปที่ 5.59 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ
 $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 207\angle -120^\circ$ kV $V_C = 253\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



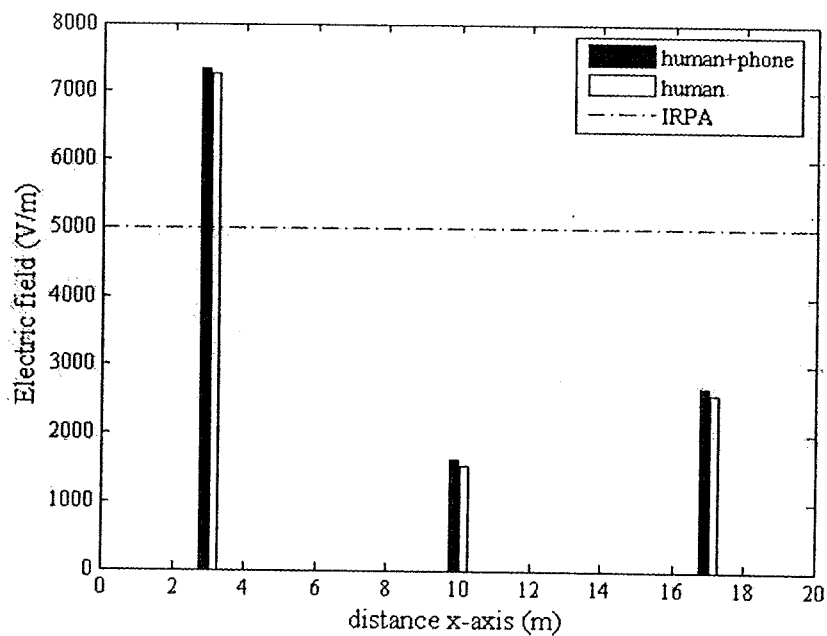
รูปที่ 5.60 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 253 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 230 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 207 \angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



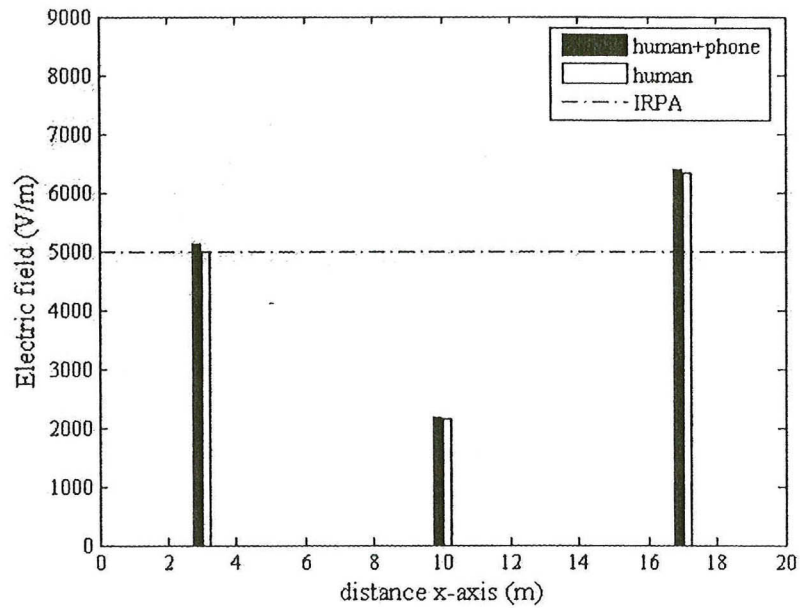
รูปที่ 5.61 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 207 \angle 0^\circ$ kV $V_B = 253 \angle -120^\circ$ kV $V_C = 230 \angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 17$ m



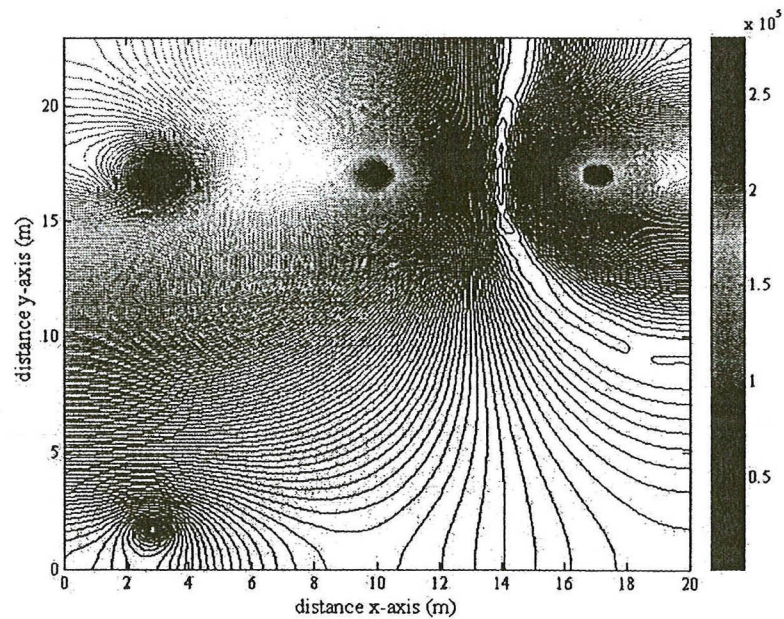
รูปที่ 5.62 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 1



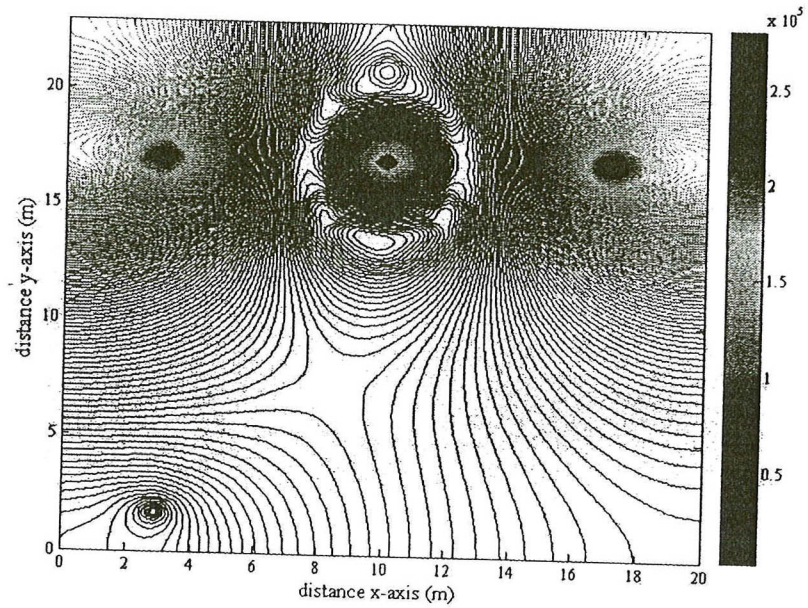
รูปที่ 5.63 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 2



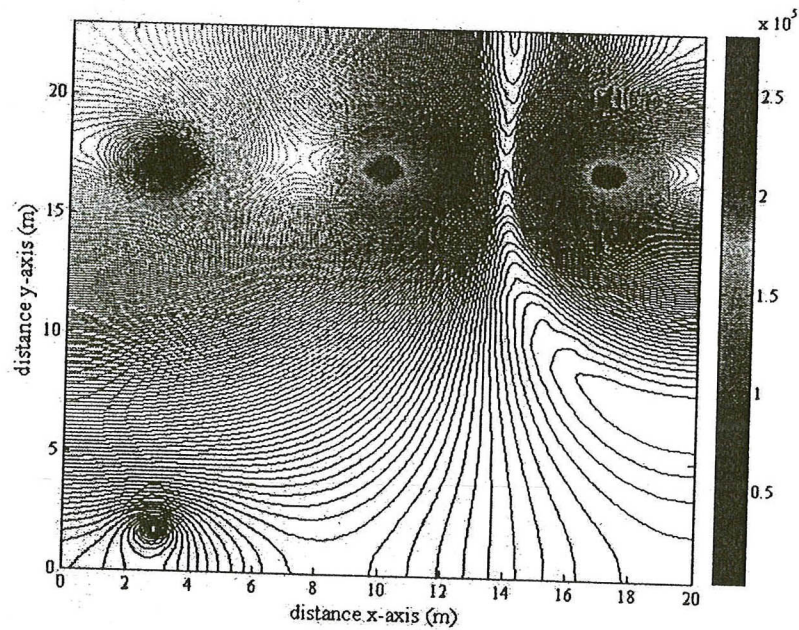
รูปที่ 5.64 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (ขนาด) 230 kV แบบที่ 3 - กรณีมุมเฟสไม่สมดุล ($\pm 30^\circ$ ของมุมเฟสอ้างอิง)



รูปที่ 5.65 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 0^\circ$ kV $V_B = 230\angle -150^\circ$ kV $V_C = 230\angle 150^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x = 3$ m

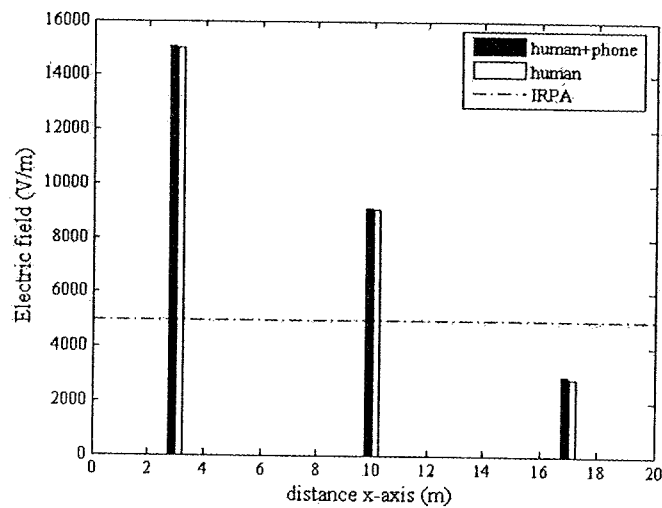


รูปที่ 5.66 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle 30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -120^\circ$ kV $V_C = 230\angle 90^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x=3$ m

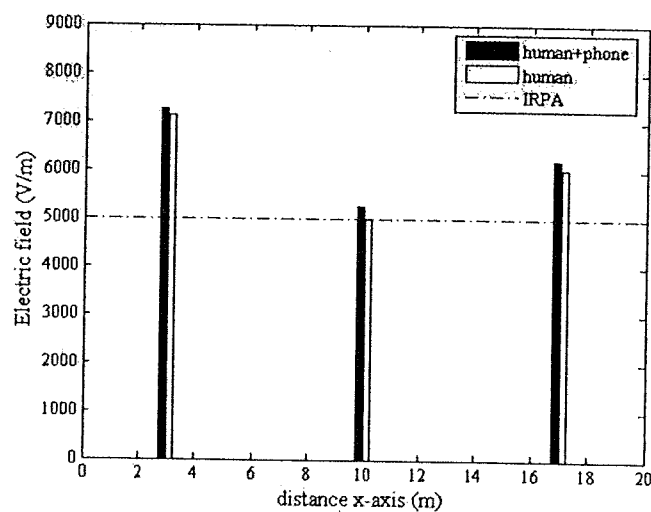


รูปที่ 5.67 การกระจายค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อ $V_A = 230\angle -30^\circ$ kV $V_B = 230\angle -90^\circ$ kV $V_C = 230\angle 120^\circ$ kV ณ ตำแหน่ง $x=3$ m

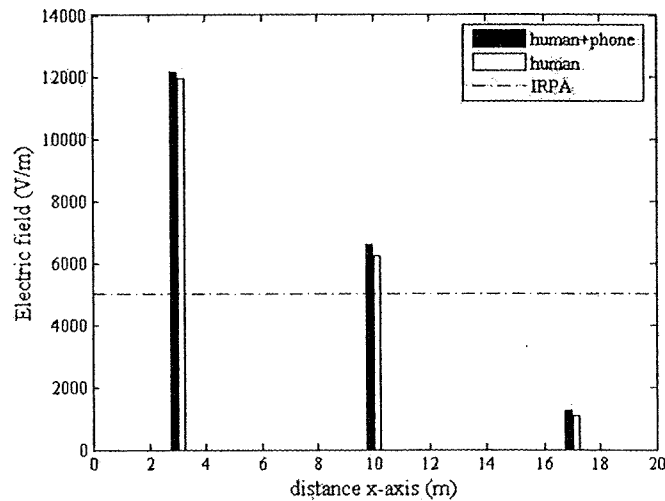
ส่วนการกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล เมื่อมนุษย์ใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่ง $x = 10$ m และ 17 m จะมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกันกับ เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่ง $x = 3$ m ที่ผ่านมาทุกประการ โดยจะมีความแตกต่างกันตรงขนาดเท่านั้น จึงไม่ขอนำเสนอในที่นี้ แต่ได้แสดงเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งดังกล่าวได้ดังรูป



รูปที่ 5.68 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 1



รูปที่ 5.69 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 2



รูปที่ 5.70 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า (V/m) บริเวณศีรษะมนุษย์จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล (เฟส) 230 kV แบบที่ 3

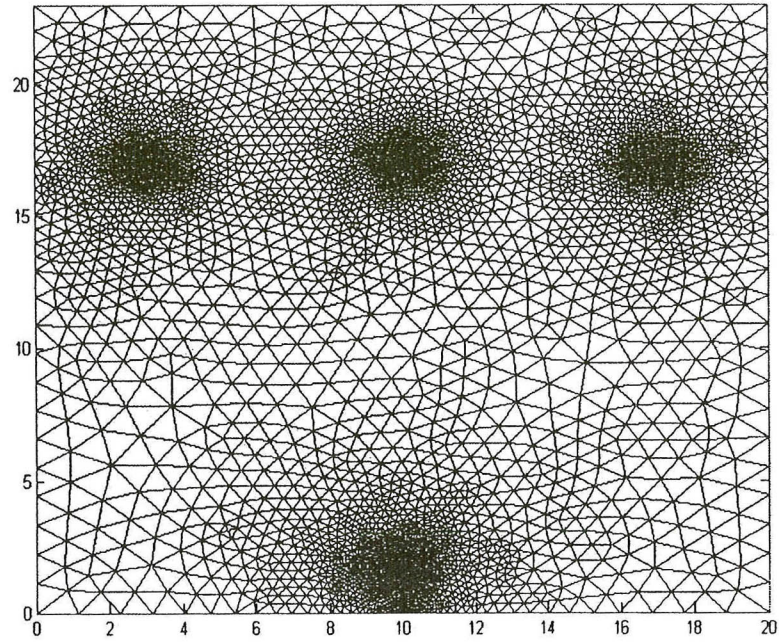
เมื่อสังเกตการณ์เปรียบเทียบผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าของระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะเห็นว่าภาพลักษณะการกระจายค่าสนามไฟฟ้า และกราฟเส้นคอนทัวร์จากระเบียบวิธีทั้งสองภายในระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟสขนาดต่าง ๆ มีลักษณะใกล้เคียงกัน และเกือบเหมือนกันทุกภาพการจำลอง ซึ่งสอดคล้องเป็นไปในทำนองเดียวกันตามทฤษฎี

5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองแบบ 2 มิติกับโปรแกรมสำเร็จรูป

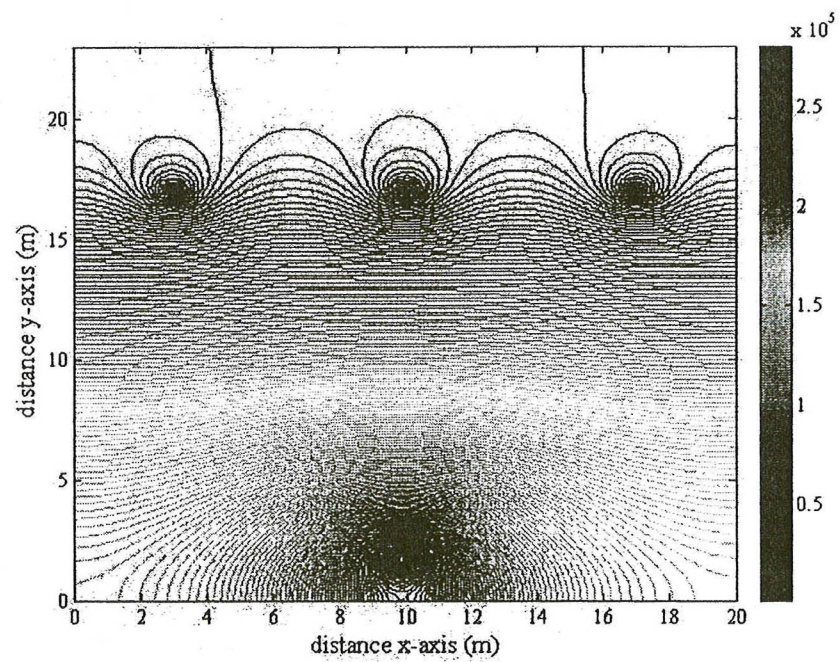
เพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทั้งสองวิธี คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะทำการเปรียบเทียบผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้ากับโปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL โดยจะขอยกตัวอย่างอย่างง่ายเพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าด้วยระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV จากโปรแกรม PDETOOL สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบได้ดังนี้ (การเปรียบเทียบผลในครั้งนี้ จะพิจารณาเฉพาะขนาดแรงดันของสายส่ง ส่วนมุมเฟสจะไม่นำมาพิจารณา ทั้งนี้เพราะโปรแกรม PDETOOL มีข้อจำกัดในส่วนของการคำนวณเชิงซ้อน)

ตารางที่ 5.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับโปรแกรม PDETOOL

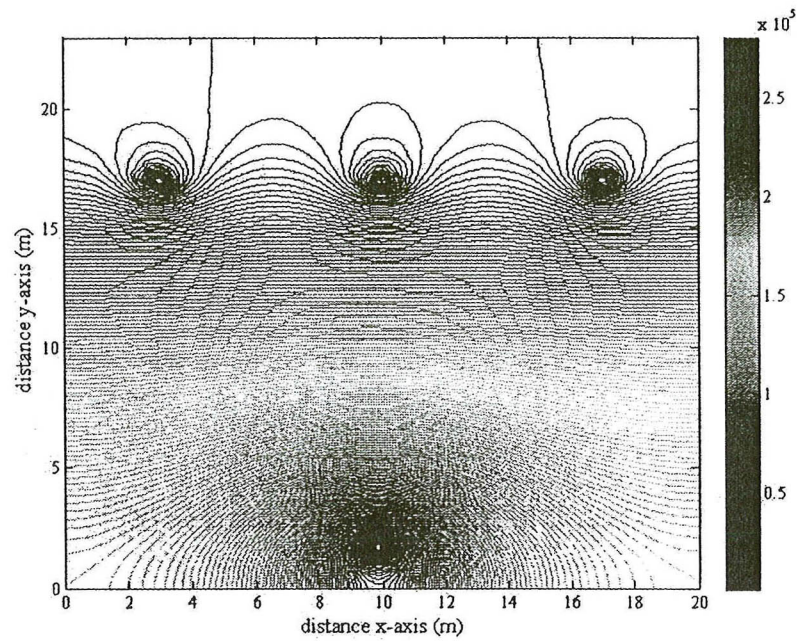
ตัวนำในสายส่ง 230 kV	
พารามิเตอร์	ค่า
ค่าสนามไฟฟ้าในตัวนำที่ 1 (E_1)	2.8203×10^5 V/m
ค่าสนามไฟฟ้าในตัวนำที่ 2 (E_2)	2.8203×10^5 V/m
ค่าสนามไฟฟ้าในตัวนำที่ 3 (E_3)	2.8203×10^5 V/m
ความถี่ (f)	50 Hz
รัศมีตัวนำ (r)	0.01 m
อากาศ	
พารามิเตอร์	ค่า
สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ(μ_0)	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ในอากาศ (μ_r)	1.00000037
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (ϵ_0)	8.854×10^{-12} F/m
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ในอากาศ (ϵ_r)	1
มนุษย์	
พารามิเตอร์	ค่า
สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ(μ_0)	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ในมนุษย์(μ_r)	1.00000037
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (ϵ_0)	8.854×10^{-12} F/m
สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ในมนุษย์ (ϵ_r)	5
โทรศัพท์มือถือ	
พารามิเตอร์	ค่า
บริเวณขอบบนซ้ายของตัวเครื่อง (P_1)	45.5 V/m
บริเวณขอบบนขวาของตัวเครื่อง (P_2)	45.5 V/m
บริเวณขอบด้านซ้ายของตัวเครื่อง (P_3)	33.5 V/m
บริเวณขอบด้านขวาของตัวเครื่อง (P_4)	48.2 V/m
บริเวณขอบล่างซ้ายของตัวเครื่อง (P_5)	48.5 V/m
บริเวณขอบล่างขวาของตัวเครื่อง (P_6)	48.5 V/m



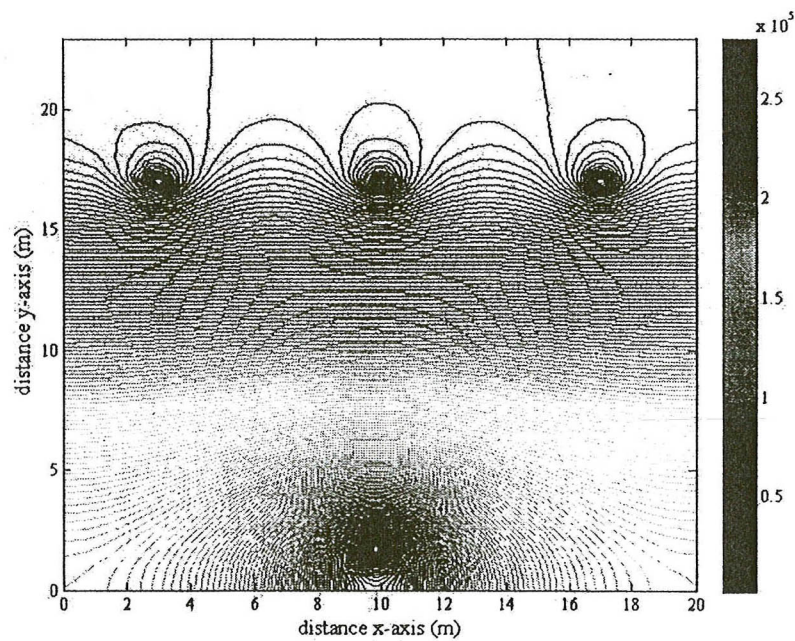
รูปที่ 5.71 การออกแบบกริดด้วย PDETOOL ของระบบสายส่งไฟฟ้าขนาด 230 kV



รูปที่ 5.72 การกระจายสนามไฟฟ้าที่กระจายรอบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ด้วย PDETOOL



รูปที่ 5.73 การกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์



รูปที่ 5.74 การกระจายค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

หลังการออกแบบกริดของระบบสายส่งไฟฟ้า 230 kV ด้วยโปรแกรม PDETOOL จะสามารถออกแบบได้ดังรูปที่ 5.108 จากนั้นทำการหาค่าผลเฉลยที่ได้จาก PDETOOL และนำค่าผลเฉลยที่ได้มาวาดกราฟใหม่ในโปรแกรม MATLAB™ โดยรูปที่ 5.109 คือ กราฟการกระจายค่าสนามไฟฟ้ารอบสายส่ง และสามารถแสดงผลดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์กับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ดังรูปที่ 5.110 และรูปที่ 5.111 ตามลำดับ

จะสังเกตเห็นว่าผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV ของโปรแกรม PDETOOL จะมีผลเฉลยใกล้เคียงกันกับระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และเพื่อให้เห็นถึงความถูกต้องในการคำนวณมากยิ่งขึ้น จึงทำการเปรียบเทียบคำตอบระหว่างโนดต่อโนดของแต่ละวิธี โดยอาศัยตำแหน่งพิกัดคำตอบของระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นหลักในการอ้างอิง (847 โหนด) ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการได้ดังนี้

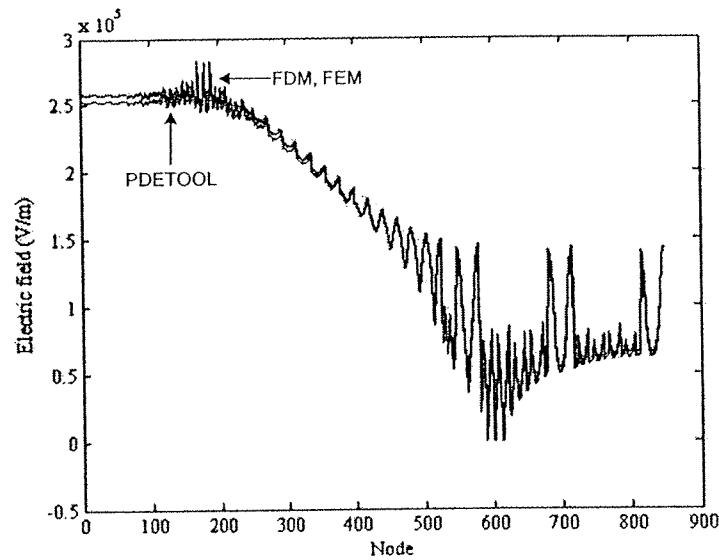
ดำเนินการที่ PDETOOL:

1. สร้างระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV
2. เก็บค่าผลเฉลยจาก PDETOOL และค่าตำแหน่งพิกัดของแต่ละโนด
3. ใช้คำสั่ง griddata ของโปรแกรม MATLAB™ ในการหาคำตอบตามโนดอ้างอิงของระบบตามระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยอาศัยข้อมูลในการคำนวณจากขั้นตอนที่ 2

ดำเนินการที่ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์:

4. สร้างระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV
5. เก็บค่าผลเฉลยจาก ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และค่าตำแหน่งพิกัดของแต่ละโนด
6. ใช้คำสั่ง griddata ของโปรแกรม MATLAB™ ในการหาคำตอบตามโนดอ้างอิงของระบบตามระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้ข้อมูลในการคำนวณจากขั้นตอนที่ 5
7. เปรียบเทียบคำตอบโนดต่อโนดระหว่างผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าของระเบียบวิธีทั้งสอง คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และ ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับโปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL

จากวิธีดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าของระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และ ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับโปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5.112 โดยรูปดังกล่าวจะเปรียบเทียบคำตอบแบบโนดต่อโนดทั้งหมดภายใต้ระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV



รูปที่ 5.75 ค่าตอบโนดต่อโนดภายในช่วงโนด 1-847

ตารางที่ 5.3 ระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย

สถานที่	ค่าสนามไฟฟ้า (E) (kV/m)
สถานประกอบการ	
- ตลอดชั่วโมงการทำงาน	10
- ช่วงเวลาสั้น	30
สาธารณะ	
- ตลอด 24 ชั่วโมง	5
- 2-3 ชั่วโมง	10

เมื่อสังเกตการเปรียบเทียบผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าของระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบไฟไนต์อีลิเมนต์ กับ โปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL จะเห็นว่าเส้นกราฟจากระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และระเบียบไฟไนต์อีลิเมนต์มีลักษณะใกล้เคียงกันมากและเกือบทับกันพอดี ตลอดทุกช่วงโนดดังปรากฏในรูปที่ 5.112 ในขณะที่ผลเฉลยค่าสนามไฟฟ้าจากโปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL จะมีลักษณะเส้นกราฟในทำนองเดียวกับระเบียบวิธีทั้งสองเช่นกัน แต่จะให้ผลเฉลยที่แตกต่างบ้างในบางช่วงคำตอบ โดยสาเหตุความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมาจากการกำหนดค่ารัศมีตัวนำของสายส่งภายใน โปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL เพราะเนื่องจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธี

ไฟในทรีดเฟอเรนซ์ และ ระเบียบไฟในทรีดเฟอเรนซ์จะกำหนดให้ตัวนำมีลักษณะเป็นจุด ในขณะที่โปรแกรม PDETOOL ไม่สามารถกำหนดให้ตัวนำเป็นจุดได้ จะต้องทำการป้อนค่ารัศมีตัวนำทุกครั้งทำการคำนวณ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดความแตกต่างของผลเฉลยที่ได้

จากมาตรฐานขององค์กร International Radiation Protection Association (IRPA) ได้ระบุข้อกำหนดระดับค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัยดังตารางที่ 5.3 จากข้อกำหนดดังกล่าวจะใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบระยะห่างของมนุษย์จากสายส่งที่เหมาะสม โดยดูจากค่าสนามไฟฟ้าที่ปลอดภัยสำหรับมนุษย์ ในที่นี้จะเลือกใช้ระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่มนุษย์สัมผัสได้อย่างปลอดภัยเท่ากับ 5 kV/m (สาธารณะ) เพราะเนื่องจากระบบที่ศึกษาเปรียบเสมือนบริเวณพื้นที่โล่งที่มีผู้คนผ่านไปมาอยู่ตลอดเวลา รวมถึงการใช้งานโทรศัพท์มือถือสื่อสารในบริเวณดังกล่าวด้วย จากผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าทั้งหมดของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 69 kV ระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 230 kV และ 500 kV ระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลขนาด 230 kV จะเห็นว่าภายในระบบไฟฟ้า 1 เฟส จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 5 kV/m ด้วยเหตุนี้การใช้งานโทรศัพท์มือถือในบริเวณระบบดังกล่าวจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ที่ใช้งานโทรศัพท์มือถือในบริเวณนั้น ในขณะที่ระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และ 3 เฟสไม่สมดุลจะมีปริมาณค่าสนามไฟฟ้าเกิน 5 kV/m โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลและ 3 เฟสไม่สมดุลขนาด 230 kV และ 500 kV ที่มีค่าสนามไฟฟ้าสูงถึง 2.5×10^5 V/m และ 5.5×10^6 V/m ตามลำดับ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายอย่างยิ่งต่อมนุษย์ที่ใช้งานโทรศัพท์มือถือในขณะที่เข้าใกล้บริเวณระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล นอกจากนี้การลดหย่อนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงก็เป็นสาเหตุสำคัญสาเหตุหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ผู้ใช้โทรศัพท์มือถือได้เช่นกัน

5.7 สรุป

บทที่ 5 เป็นการจำลองผลเพื่อศึกษาถึงผลกระทบค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากการใช้งานโทรศัพท์มือถือของมนุษย์ภายใต้บริเวณสายส่งไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟในทรีดเฟอเรนซ์ และระเบียบไฟในทรีดเฟอเรนซ์แบบ 2 มิติ จากการจำลองผลของระบบสายส่งไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 220 V 22 kV และ 69 kV ระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลขนาด 69 kV 115 kV 230 kV และ 500 kV และระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุล จะได้ผลเฉลยไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองระเบียบวิธี โดยสามารถตรวจสอบความถูกต้องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป PDETOOL ที่มีความเชื่อถือได้ ซึ่งให้ผลเฉลยสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับระเบียบวิธีทั้งสอง นอกจากนี้ยังสามารถระบุระบบที่มีความเสี่ยงต่อความปลอดภัยจากการใช้งานโทรศัพท์มือถือของมนุษย์ภายใต้บริเวณสายส่งได้ตามมาตรฐานของ IRPA