หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

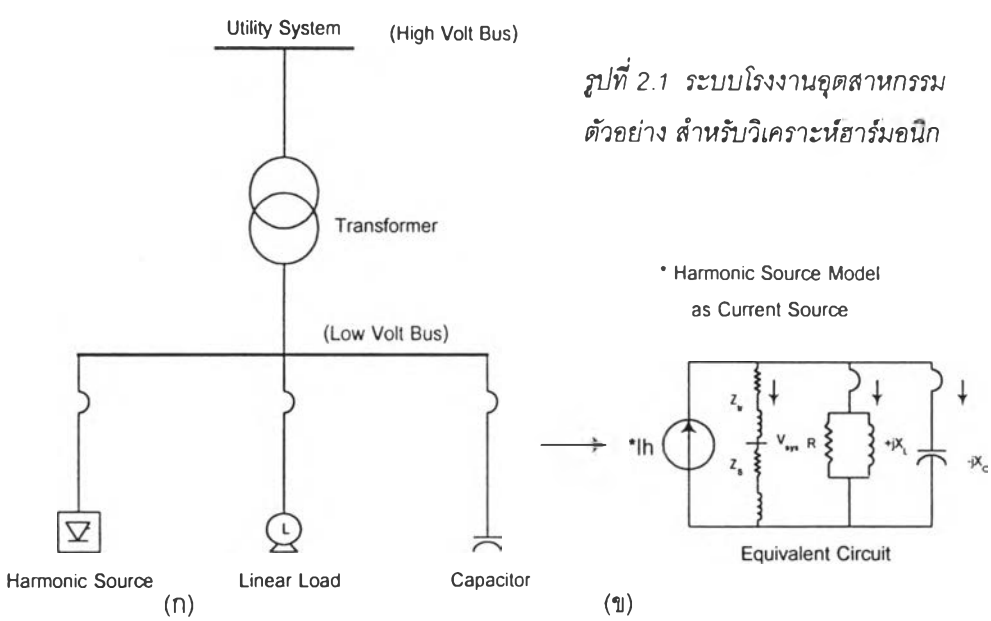
การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมนำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เข้ามาใช้ จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก ก่อนการติดตั้งใช้งาน โดยเฉพาะกรณีที่โรงงานมีชุดคาปาซิเตอร์ ที่ติดตั้งใช้งานเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพราะว่า ผลของคาปาซิเตอร์อาจทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นได้ นอกจากนี้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกยังจำเป็นในแง่ของการประเมินตามกฎข้อบังคับ หรือ มาตรฐาน เพื่อควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้า

2.1 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยวงจรสมมูล

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยวงจรสมมูล สิ่งสำคัญคือ ต้องหาอิมพีแดนซ์สมมูลที่แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกมองเห็น และ จะถือว่าทราบค่ากระแสฮาร์มอนิกแล้ว ซึ่งอาจได้จากการตรวจวัด หรือ ได้จากการประเมินทางทฤษฎีตามชนิดของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก เช่น กระแสฮาร์มอนิกจากเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า หรือ เรียกว่าคอนเวอร์เตอร์ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h จะมีขนาดเป็น I1/h เป็นต้น จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ของทฤษฎีวงจรไฟฟ้าวิเคราะห์หาค่าแรงดันฮาร์มอนิกได้

พิจารณาระบบโรงงานอย่างง่ายตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้าหาความสัมพันธ์ของ กระแส แรงดัน และ อิมพีแดนซ์สมมูล ได้ดังนี้

$$Vh = ZhxIh \quad (2.1)$$

$$Zh = \frac{1}{\frac{1}{Zh_{Tr} + Zh_S} + \frac{1}{Zh_L} + \frac{1}{Zh_C}} \quad (2.2)$$

เมื่อทราบค่า Vh จากนั้นพิจารณาหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของวงจรดังนี้

$$Ih_L = \frac{Vh}{Zh_L} \quad (2.3)$$

$$Ih_C = \frac{Vh}{Zh_C} \quad (2.4)$$

$$Ih_S = \frac{Vh}{Zh_{Tr} + Zh_S} \quad (2.5)$$

$$Vh_{PCC} = Ih_S x Zh_S \quad (2.6)$$

เมื่อ Vh = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่

Ih = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h จากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

Ih_S = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านหม้อแปลงออกสู่ระบบไฟฟ้า

Ih_L = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านไปยังโหลดเชิงเส้น

Ih_C = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านไปยังคาปาซิเตอร์

Zh = ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ที่ แหล่งกำเนิดกระแส Ih มองเห็น

Zh_T = ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ของหม้อแปลง

Zh_S = ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ของระบบไฟฟ้า

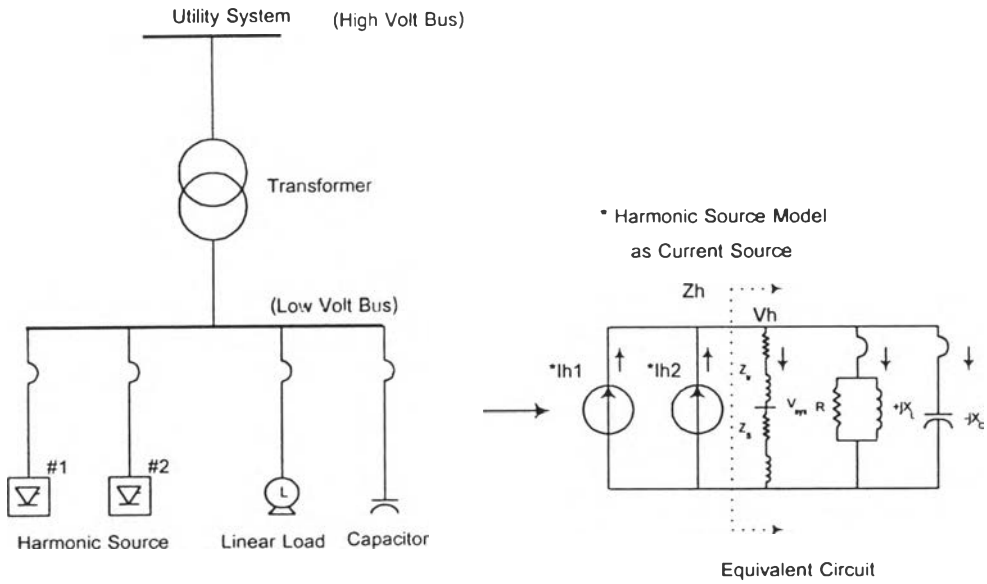
Zh_L = ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ของโหลดเชิงเส้น

Zh_C = ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ของคาปาซิเตอร์

Vh_{PCC} = แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับการไฟฟ้า (PCC)

ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในที่นี้ จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน (Complex number) สำหรับการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน หรือ กฎข้อบังคับของการไฟฟ้า จะพิจารณาค่าของ Ih_S และ Vh_{PCC} (ที่จุดต่อร่วม) หรือ จุดที่ต่ออุปกรณ์โดยตรง ขึ้นอยู่กับมาตรฐานฉบับนั้นๆจะกำหนด

พิจารณาตัวอย่างของระบบโรงงาน 3 แบบ ดังนี้คือ แบบที่ 1 เป็นกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก 1 ชุดต่ออยู่ที่บัส (ดังรูปที่ 2.1) แบบที่ 2 เป็นกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกมากกว่า 1 ชุดต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน (ดังรูปที่ 2.2) แบบที่ 3 เป็นกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกมากกว่า 1 ชุดแต่ไม่ได้ต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน (ดังรูปที่ 2.3)

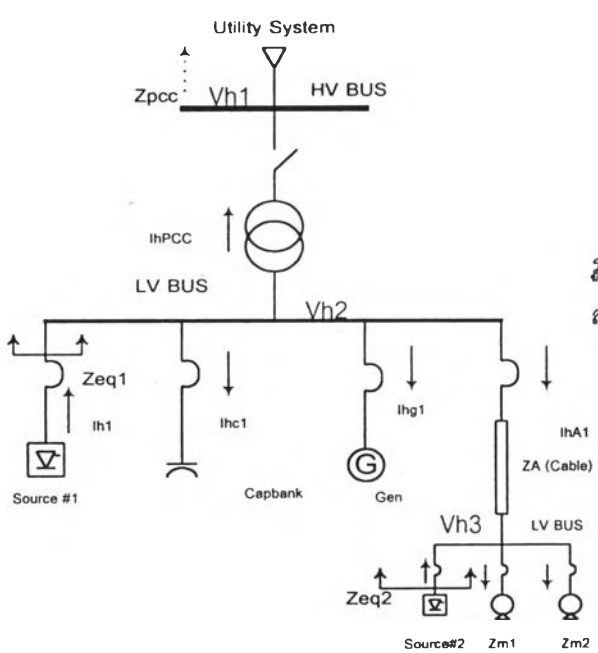


รูปที่ 2.2 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบที่ 2

จากรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างการวิเคราะห์แบบที่ 2 ซึ่งมีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก 2 ชุด ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้หลักการ ของ Superposition กล่าวคือ คิดทีละแหล่งกำเนิดแล้วนำผลที่ได้มารวมกันทางพีชคณิต ดังนั้น กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์จะเป็นผลมาจาก แหล่งกำเนิดทั้งสองรวมกัน เช่น พิจารณา แรงดันฮาร์มอนิกที่บัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่จะได้

$$Vh = Ih1xZh+Ih2xZh = (Ih1+Ih2)xZh \quad (2.7)$$

จะเห็นว่า แรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น หรือ ลดลง ขึ้นอยู่กับ ขนาด และ มุมเฟสของ แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกทั้งสอง ในกรณีเลวร้ายสุด (Worst case) จะรวมกระแสฮาร์มอนิกโดยไม่พิจารณามุมเฟส สำหรับการวิเคราะห์แบบที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกไม่ได้ต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน ในการวิเคราะห์จะทำได้โดยพิจารณาตัวอย่างระบบโรงงานดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ แบบที่ 3

จากรูปที่ 2.3 เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกทั้งสองไม่ได้ต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน ในกรณีนี้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่มองจากแหล่งกำเนิดแต่ละจุดจะไม่เหมือนกัน โดย Zeq1 เป็นอิมพีแดนซ์สมมูลที่มองจาก แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกชุดที่ 1 และ Zeq2 เป็นอิมพีแดนซ์สมมูลที่มองจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกชุดที่ 2 ตามลำดับ อิมพีแดนซ์สมมูลทั้ง 2 มีค่าดังนี้ [14]

$$Zeq1 = \frac{1}{\frac{1}{Zh_{PCC}+Zh_{Tr}}+\frac{1}{Zh_g}+\frac{1}{Zh_C}+\frac{1}{Zh_A+\frac{1}{\frac{1}{Zh_{m1}}+\frac{1}{Zh_{m2}}}}} \quad (2.8)$$

$$Zeq2 = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{Zh_{PCC}+Zh_{Tr}}+\frac{1}{Zh_g}+\frac{1}{Zh_C}}+Zh_A+\frac{1}{Zh_{m1}}+\frac{1}{Zh_{m2}}} \quad (2.9)$$

เมื่อได้ Zeq1 และ Zeq2 แล้ว จะใช้สมการพื้นฐานที่ (2.1) เพื่อหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกของ บัส ที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ จากนั้นหาการกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ต่างๆดังได้กล่าวมาแล้ว จากรูปที่ 2.3 ถ้าต้องการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 จะได้ดังนี้

$$Vh2 = Ih1XZeq1 \quad (2.10)$$

$$Ih_S1 = \frac{Vh2}{Zh_{PCC}+Zh_{Tr}} \quad (2.11)$$

$$Ih_C1 = \frac{Vh2}{Zh_C} \quad (2.12)$$

$$Ih_g1 = \frac{Vh2}{Zh_g} \quad (2.13)$$

$$Ih_A = \frac{Vh2}{Zh_A+\frac{1}{\frac{1}{Zh_{m1}}+\frac{1}{Zh_{m2}}}} \quad (2.14)$$

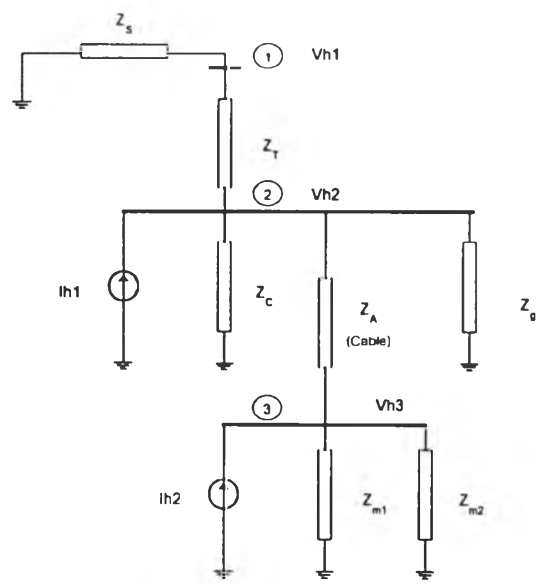
ในทำนองเดียวกันการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 จะคำนวณในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เริ่มต้นหาแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสที่ คอนเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ต่ออยู่ ก่อน (บัสที่ 3) จากนั้นหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกตามส่วนต่างๆในวงจร แล้วนำไปรวมกับผลจากคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ตามหลักการของ Superposition

จะเห็นได้ว่า วิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยการแทนด้วยวงจรสมมูล และการยุบวงจรจะมีความสะดวกในกรณีที่ วงจรมีขนาดเล็ก ไม่ซับซ้อน แต่ถ้าวงจรมีขนาดใหญ่ หรือ แหล่งกำเนิด

ฮาร์มอนิกมีหลายที่ และ ไม่อยู่ที่บัสเดียวกัน (เช่นแบบที่ 3) การมองเป็นวงจรสมมูล จะทำได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงมีการนำเอาหลักการวิเคราะห์วงจรด้วยเมตริกซ์ความนำ (Admittance Matrix : Y_{BUS}) มาช่วยในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก จะทำให้การวิเคราะห์สะดวกขึ้น

2.2 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยการใช้ เมตริกซ์ความนำ (Admittance Matrix :Y_{BUS})

วิธีการนี้จะมีประโยชน์มากสำหรับ ระบบโรงงานที่มีขนาดใหญ่ หรือ ระบบที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกหลายจุด โดยจะเริ่มต้นจากการสร้างเมตริกซ์ความนำ (Y_{BUS}) ของระบบก่อน โดยอุปกรณ์ต่างๆจะแทนด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก และ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะถูกแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแสฉีด (Inject current) เข้าบัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ จากรูปที่ 2.3 ถ้าเขียนวงจรสมมูลเพื่อสร้าง เมตริกซ์ความนำที่ความถี่ฮาร์มอนิก จะได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.3 เพื่อนำมาสร้าง Y_{BUS}

จากวงจรสมมูลสามารถสร้าง Y_{BUS} โดยเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ความนำ $[Y_{BUS}]$ ได้โดยการแทนค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละส่วนของระบบดังสมการที่ (2.15)

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_S}+\frac{1}{Z_T} & -\frac{1}{Z_T} & 0 \\ -\frac{1}{Z_T} & \frac{1}{Z_T}+\frac{1}{Z_C}+\frac{1}{Z_g}+\frac{1}{Z_A} & -\frac{1}{Z_A} \\ 0 & -\frac{1}{Z_A} & \frac{1}{Z_A}+\frac{1}{Z_{m1}}+\frac{1}{Z_{m2}} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

จากสมการ [I] = [Y][V] ดังนั้นที่ความถี่ฮาร์มอนิก เขียนสมการได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Ih1 \\ Ih2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Zh_S}+\frac{1}{Zh_T} & -\frac{1}{Zh_T} & 0 \\ -\frac{1}{Zh_T} & \frac{1}{Zh_T}+\frac{1}{Zh_C}+\frac{1}{Zh_g}+\frac{1}{Zh_A} & -\frac{1}{Zh_A} \\ 0 & -\frac{1}{Zh_A} & \frac{1}{Zh_A}+\frac{1}{Zh_{m1}}+\frac{1}{Zh_{m2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vh1 \\ Vh2 \\ Vh3 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) เมื่อทราบ [Ih] และ $[Yh_{BUS}]$ สามารถหา [Vh] ได้ดังสมการที่ (2.17)

$$[Vh] = [Yh_{BUS}]^{-1}[Ih] \quad (2.17)$$

เมื่อได้ผลลัพธ์ของ [Vh] แล้ว สามารถหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกผ่านอุปกรณ์ต่างๆได้ เช่น

$$Ih_{Tr} = \frac{Vh2 - Vh1}{Zh_{Tr}} \quad (2.18)$$

$$Ih_C = \frac{Vh2}{Zh_C} \quad (2.19)$$

สำหรับกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไปยังส่วนอื่นๆก็หาได้ในทำนองเดียวกันนี้ จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยระบบเมตริกซ์จะสะดวกกว่าในกรณีระบบของโรงงานมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกไม่ได้ต่ออยู่ที่บัสเดียวกัน ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อคิดที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนไปตามความถี่ฮาร์มอนิกอย่างไรนั้นจะขึ้นกับแบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิกของอุปกรณ์นั้นๆ

2.3 แบบจำลองของอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะถูกต้องเพียงใดนั้นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การจำลองแบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ในระบบที่วิเคราะห์ สำหรับอุปกรณ์ที่ควรพิจารณาแบบจำลองในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมคือ [14]

- โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่
- หม้อแปลง
- สายเคเบิลหรือสายส่งจ่ายย่อยที่เชื่อมระหว่างบัสในโรงงาน
- คาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
- ชุดกรองฮาร์มอนิก
- เครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งภายในที่เดินขนานอยู่กับระบบไฟฟ้าหรือ มอเตอร์ขนาดใหญ่
- โหลดขนาดใหญ่
- แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม จะใช้การจำลองที่เป็นแบบง่ายดังบทความวิจัยหลายๆบทความ [5,6,10,11] กล่าวคือ ไม่คิดผลของ Skin effect ซึ่งค่าความต้านทานจะไม่เปลี่ยนตามความถี่ และถือว่าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้น ค่าต่างๆจะเป็นค่าต่อเฟส รายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้มีดังนี้

2.3.1 **โครงข่ายระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่** [14]

จุดที่โรงงานอุตสาหกรรมต่อร่วมอยู่กับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้า หรือเรียกว่า จุดต่อร่วม (PCC) เมื่อมองจากจุดนี้กลับไปยังแหล่งจ่ายไฟจะแทนแบบจำลองของระบบด้วยอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมระหว่างค่าความต้านทาน กับ ค่ารีแอคแตนซ์ ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์จะบอกมาในรูปของอัตราส่วน X/R (XR ratio) ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจ่ายไฟมีค่าดังนี้

$$Zh_S = R1_S + jhX1_S \quad (2.20)$$

เมื่อ Zh_S = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

$R1_S$ = ค่าความต้านทานที่ความถี่หลักมูลของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

$X1_S$ = ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่หลักมูลของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

h = เลขลำดับฮาร์มอนิก

โดยทั่วไป ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าจะเป็น ค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดต่อร่วม และ X/R ratio ปกติจะมีค่าประมาณ 10 กล่าวคือ $R1_S \approx 0.1X1_S$ [6] จากข้อมูลเหล่านี้นำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจ่ายไฟได้

2.3.2 **แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า**

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมเป็นหม้อแปลงขนาดปานกลางมีพิกัดน้อยกว่าหม้อแปลงที่ติดตั้งตามสถานีไฟฟ้าย่อย และ ส่วนใหญ่แล้วจะทำงานที่แรงดันต่ำกว่าพิกัด [5] ดังนั้นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม จึงจำลองหม้อแปลงด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบด้วยค่าของ ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (Leakage reactance) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเลขลำดับฮาร์มอนิก ส่วนค่าความต้านทานหากไม่คิดผลของ Skin effect จะถือว่ามีค่าคงที่ ดังนั้นที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงมีค่าเป็น

$$Zh_T = R1_T + jhX1_T \quad (2.21)$$

เมื่อ Zh_T = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของหม้อแปลง

$R1_T$ = ค่าความต้านทานที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง

$X1_T$ = ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง

นอกจากนี้แบบจำลองของหม้อแปลงจะขึ้นกับการต่อขดลวดของหม้อแปลง และ เลขลำดับฮาร์มอนิก (ลำดับบวก ลำดับลบ ลำดับศูนย์) ด้วย ในกรณีที่เป็นเลขฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ (3,6,9,12,15,...) ฮาร์มอนิกเหล่านี้จะไหลผ่านระหว่างขดลวดได้ ถ้าหม้อแปลงมีการต่อแบบวาย-วาย และ มีการต่อกราวด์ทั้งสองด้านโดยแบบจำลองจะเป็นไปตามสมการที่ (2.21) ส่วนหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบอื่นๆ จะเป็นไปตามวงจรของหม้อแปลงในลำดับศูนย์ (Zero-sequence circuit) สำหรับข้อมูลที่ได้จากหม้อแปลงส่วนใหญ่ คือ ค่าร้อยละของอิมพีแดนซ์ (%Z) ค่ากำลังสูญเสีย (Power loss) หรือ ค่า X/R ratio ซึ่งสำหรับระบบจำหน่ายจะมีค่า X/R ประมาณ 10 [6]

2.3.3 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น

สำหรับข้อมูลโหลดโดยทั่วไปแล้ว จะแทนอยู่ในรูปของกำลังงานจริง (P) และ กำลังงานรีแอคทีฟ (Q) ซึ่งใช้สำหรับการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลสำหรับการคำนวณโหลดโฟล์วที่ความถี่หลักมูล ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบอุตสาหกรรมแล้ว แบบจำลองของโหลดจะใช้ลักษณะเดียวกันกับการคำนวณโหลดโฟล์ว กล่าวคือ อิมพีแดนซ์จะประกอบด้วย ค่าความต้านทาน และ ค่า รีแอคแตนซ์ ต่ออนุกรม หรือ ขนานกันอยู่ [5] ซึ่งการที่จะใช้แบบใดนั้น ขึ้นกับข้อมูลของโหลดนั้นๆ ในที่นี้จะใช้การจำลองของโหลดแบบขนาน โดย ค่าความต้านทาน และ ค่ารีแอคแตนซ์ หาได้จาก กำลังงานจริง (P) และ กำลังงานรีแอคทีฟ (Q) ของโหลดนั้นๆตามลำดับดังสมการที่ (2.22) และ สมการที่ (2.23) ซึ่งถือว่า โหลดต้องการค่ากำลังงานทั้ง 2 นี้คงที่ (Constant P,Q)

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

$$Rh_L = \frac{U^2_{n.net}}{P_1} \tag{2.22}$$

$$Xh_L = h\frac{U^2_{n.net}}{Q_1} \tag{2.23}$$

เมื่อ Rh_L = ค่าความต้านทานที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของโหลด

Xh_L = ค่ารีแอคแตนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของโหลด

$U_{n.net}$ = แรงดันในสภาวะปกติของระบบที่โหลดต่ออยู่

P_1 = กำลังงานจริงภายใต้สภาวะแรงดันปกติของระบบที่โหลดต่ออยู่

Q_1 = กำลังงานรีแอคทีฟภายใต้สภาวะแรงดันปกติของระบบที่โหลดต่ออยู่

จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ต้องการเพื่อการจำลองแบบของโหลดซึ่งใช้แบบขนาน คือกำลังงานจริง กำลังงานรีแอคทีฟ และ แรงดันของระบบในสภาวะที่โหลดทำงาน

2.3.4 **แบบจำลองของมอเตอร์**

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ในส่วนของ โรเตอร์ และสเตเตอร์ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะแทนแบบจำลองของมอเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกด้วยค่ารีแอคแตนซ์รวมทั้งของโรเตอร์และสเตเตอร์ ต่ออนุกรมกับค่าความด้านทาน ตามแบบจำลองของ IEC909 [16] ดังนั้นอิมพีแดนซ์หาได้จากสมการที่ (2.24)

$$Zh_M = R1_M + jhX1_M \quad (2.24)$$

โดยที่

$$Z1_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (2.25)$$

เมื่อ Zh_M = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของมอเตอร์

U_{rM} = ค่าแรงดันพิกัดของมอเตอร์

I_{rM} = ค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์

S_{rM} = กำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์

I_{LR}/I_{rM} = อัตราส่วนของกระแสยึดหมุนต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ $R1_M/X1_M$ ให้ใช้ค่าดังนี้

R_M/X_M = 0.1, $X_M = 0.995Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว $\geq$ 1 MW

R_M/X_M = 0.15, $X_M = 0.989Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว < 1 MW

R_M/X_M = 0.42, $X_M = 0.922Z_M$ สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำ

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลายๆตัวที่ต่ออยู่ที่บัสเดียวกันอาจนำมาพิจารณารวมกันเป็นกลุ่มมอเตอร์ได้

2.3.5 **แบบจำลองของสายเคเบิลหรือสายส่งย่อย [5]**

สายเคเบิลหรือสายส่งย่อยที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมี ขนาดสั้นมาก เมื่อเทียบกับสายส่งของระบบจ่ายไฟดังนั้นจะแทนค่าอิมพีแดนซ์ของสายด้วยค่า ความต้านทาน ต่ออนุกรมกับค่ารีแอคแตนซ์ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเลขลำดับฮาร์มอนิก หากไม่คิดผลของคาปาซิแตนซ์ และปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect) ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าเป็น

$$Zh_A = R1_A + jhX1_A \quad (2.26)$$

เมื่อ Zh_A = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลหรือสายส่งย่อยในโรงงาน

$R1_A$ = ค่าความต้านทานที่ความถี่หลักมูลของสายเคเบิลหรือสายส่งย่อยในโรงงาน

$X1_A$ = ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่หลักมูลของสายเคเบิลหรือสายส่งย่อยในโรงงาน

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูล ข้อมูลที่จำเป็นคือ ค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสาย ซึ่งส่วนใหญ่แล้ว จะบอกมาเป็นค่า โอห์ม ต่อ เมตร หรือ ต่อ กิโลเมตร ดังนั้นจะต้องทราบความยาวของสายด้วย

2.3.6 แบบจำลองของคาปาซิเตอร์

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่แล้วจะมีชุดคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกแล้วจะมีความสำคัญมากเพราะจะทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในโรงงานได้ สำหรับวงจรสมมูลของคาปาซิเตอร์จะแทนด้วยค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (X_C) โดยไม่คิดค่าความต้านทานที่ความถี่หลักมูล ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์สามารถหาได้จากสมการที่(2.27)

$$X1_C = \frac{V_{rated}^2}{Q_C} \qquad (2.27)$$

ที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ จะเป็นสัดส่วนกลับกับเลขลำดับฮาร์มอนิกดังสมการที่ (2.28)

$$Xh_C = -j\frac{X1_C}{h} \qquad (2.28)$$

เมื่อ $X1_C$ = ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ที่ความถี่หลักมูล

V_{rated} = แรงดันพิกัดของคาปาซิเตอร์ (แรงดันระหว่างเฟส : โวลต์)

Q_C = ค่าพิกัดกำลังงานรีแอคทีฟของคาปาซิเตอร์ (วาร์)

Xh_C = ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

2.3.7 แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิก [1]

การนำตัวกรองฮาร์มอนิกเข้ามาใช้ในโรงงาน ก็ต่อเมื่อ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่ามีปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิก และลำดับใดที่ทำให้เกิดปัญหา โดยเฉพาะปัญหาเรื่องการเกิดเรโซแนนซ์ เมื่อนำตัวกรองฮาร์มอนิกเข้ามาใช้จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ การสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกนั้นทำได้โดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอคเตอร์ (Reactor) ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์โดยตั้งความถี่เรโซแนนซ์ให้ตรงหรือใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองซึ่งเป็นแบบพาสซีฟ โดยทั่วไปตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่ 2 ประการคือ

- ให้กำลังงานรีแอคทีฟที่ความถี่หลักมูลสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- ลดกระแสฮาร์มอนิก

ตัวกรองฮาร์มอนิกจะแบ่งเป็น 2 แบบ ตามความถี่ที่ปรับคลื่น (tuned frequency) คือ

- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน (Detuned filter) จะปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีในระบบ เช่นถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกต่ำสุดคือลำดับที่ 5 จะปรับคลื่นให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 3.78 หรือ 4.08 เป็นต้น

- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูน (Tuned filter) จะปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ ที่ใกล้เคียงกับลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรอง เช่น ถ้าต้องการกรอง ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ต้องปรับคลื่นให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 4.7-4.8 เป็นต้น

การปรับคลื่นให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ลำดับฮาร์มอนิก ที่ h หมายถึง ค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของตัวรีแอคเตอร์ (X_L) เท่ากับ ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ (X_C) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \qquad X_L = X_C/h^2 \tag{2.29}$$

สำหรับตัวอย่างการตั้งค่ารีแอคแตนซ์ของตัวกรองแบบจูนที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆมีดังนี้

ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 $X_L = X_C/4.8^2 = 0.0434X_C = 4.34\%X_C$

ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 $X_L = X_C/6.8^2 = 0.0216X_C = 2.16\%X_C$

ฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 $X_L = X_C/10.8^2 = 0.0086X_C = 0.86\%X_C$

โดยที่ ค่า X_C ที่ความถี่หลักมูลมีค่าตามสมการที่ (2.27) นอกจากค่ารีแอคแตนซ์แล้วจะมีค่าความต้านทานของขดลวด ซึ่งหามาจากความสัมพันธ์ของ Q- factor มีค่าตามสมการที่ (2.30) ซึ่งเป็นค่าที่จุดเรโซแนนซ์ ของวงจรอนุกรม R-L-C

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r CR}$$

หรือ

$$Q = \frac{hX_L}{R} = \frac{X_c}{hR} \tag{2.30}$$

เมื่อ X_L = ค่ารีแอคแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

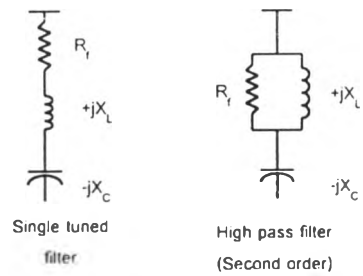
X_C = ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูล

h = จุดเรโซแนนซ์ของตัวกรองที่ปรับคลื่นไว้

$$Q = \text{Q-factor} = \omega_r\left(\frac{\text{พลังงานสะสมสูงสุด}}{\text{กำลังงานสูญเสียเฉลี่ย}}\right) = \frac{\text{ค่ารีแอคแตนซ์}}{\text{ค่าความต้านทาน}}$$

R = ค่าความต้านทานของวงจรอนุกรม R-L-C

ดังนั้นแบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกจะประกอบด้วย ความต้านทาน คาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ และ ค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ ซึ่งถ้าเป็นตัวกรองแบบ ปรับคลื่นเดี่ยว (Single tuned) องค์ประกอบทั้ง 3 อย่างนี้จะต่ออนุกรมกัน แต่ถ้าเป็นตัวกรองแบบ ผ่านสูง (High pass) ค่าความต้านทานกับค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์จะต่อขนานกัน จากนั้นจะต่ออนุกรมกับค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ แบบจำลองของตัวกรองทั้ง 2 แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่2.5 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ

สำหรับค่า R ของตัวกรองแบบ ปรับคลื่นเดี่ยว จะมีค่าดังสมการที่ (2.31)

$$R_{(For\ single\ tuned)} = \frac{hX_L}{Q_{Factor}} \tag{2.31}$$

ส่วน ค่า R ของตัวกรองแบบ ผ่านสูงลำดับสอง จะเป็นสัดส่วนกลับกัน กล่าวคือ

$$R_{(For\ high\ pass)} = \frac{Q_{Factor}}{hX_L} \tag{2.32}$$

ดังนั้นข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกคือ ค่าพิกัดของคาปาซิเตอร์ (โวลต์ วาร์) เพื่อ หาค่า X_C ที่ความถี่หลักมูล ตามสมการที่ (2.27) ความถี่ที่ต้องการกรอง เพื่อคำนวณหาค่าของ X_L ตามสมการที่ (2.29) และ ค่า Q-factor เพื่อคำนวณหาค่า R ตามสมการที่(2.30) สำหรับตัวกรองแบบ ปรับคลื่นเดี่ยว และ สมการที่ (2.32) สำหรับตัวกรองแบบผ่านสูง

2.3.8 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

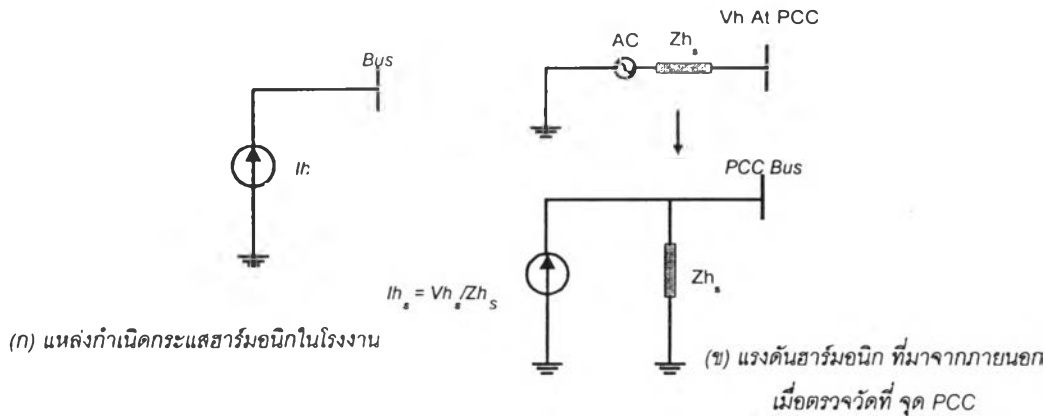
สำหรับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็น คอนเวอร์เตอร์แบบสถิต ซึ่งจะจำลองให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก [4] ต่ออยู่กับบัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ โดยข้อมูลของกระแสจะเป็นแบบอุดมคติ หรือ ได้จากการตรวจวัดจริง สำหรับรูปที่ 2.6(ข) เป็นกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนของแรงดันมาก่อน หรือ เรียกว่า Back ground harmonic voltage ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกที่มาจากด้านจ่ายไฟ เมื่อนำมาคำนวณในระบบของโรงงานจะทำการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ตามสมการที่ (2.33)

$$Ih_S = \frac{Vh_S}{Zh_S} \tag{2.33}$$

เมื่อ Ih_S = กระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟมีความผิดเพี้ยนอยู่แล้ว

Vh_S = แรงดันผิดเพี้ยนของแหล่งจ่ายไฟก่อนที่โรงงานจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ

Zh_S = ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟที่ความถี่ฮาร์มอนิก เมื่อมองจากจุด PCC



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ข้อมูลของแรงดันผิดเพี้ยนเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟนี้จะได้จากการตรวจวัดก่อนที่จะต่อระบบของโรงงานเข้ากับระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้า หรือ อาจเป็นค่าที่สมมุติขึ้น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบเมื่อแหล่งจ่ายไฟมีความผิดเพี้ยนอยู่ก่อนแล้ว แบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมาสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

Equipment	Model
Source impedance (Zh_S)	$R1_S$ $+jhX1_S$
Transformer (Zh_T)	$R1_T$ $+jhX1_T$
Cable or Line (Zh_A)	$R1_A$ $+jhX1_A$
Motor Load (Zh_M)	$R1_M$ $+jhX1_M$
Linear Load (Zh_L)	$+jhX1_L$ $R1_L$
Capacitor (Zh_C)	$-jX1_C/h$
Harmonic filter (Single tuned and High pass)	ดูรูปที่ 2.5
Harmonic Source	ดูรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข)

หมายเหตุ *แบบจำลองทั้งหมดนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย ไม่คิดผลของ Skin effect ดังนั้น ความต้านทานจึงไม่เปลี่ยนแปลงที่ความถี่ฮาร์มอนิก ส่วนค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (X_C) และ ค่าอินดักทีฟ รีแอคแตนซ์ (X_L) จะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่*

2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

จากตัวอย่างการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกมีดังนี้

- ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิด และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งปริมาณกระแสฮาร์มอนิก จะได้จากการประเมินตามทฤษฎี หรือ ได้จากการตรวจวัด ส่วนปริมาณแรงดันฮาร์มอนิก ได้จากการตรวจวัดก่อนที่จะต่อระบบของโรงงาน เข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้า หรือได้จากค่าที่สมมุติขึ้น
- รายละเอียดของอุปกรณ์ไฟฟ้า (เพื่อสร้างแบบจำลอง)
- รายละเอียดของระบบไฟฟ้า (เพื่อสร้างแบบจำลอง)

จากข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ผ่านไปยังอุปกรณ์ต่างๆในโรงงานตลอดจนส่วนที่ไหลออกไปยังระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งถ้าระบบของโรงงานมีขนาดเล็ก วงจรไม่ซับซ้อน การวิเคราะห์จะใช้การสร้างวงจรสมมูล และ การยุบวงจร แต่ถ้าระบบของโรงงานมีขนาดใหญ่ และ ซับซ้อนมากขึ้น จะใช้วิธีการสร้างเมตริกซ์ความนำ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์

2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาถึงผลกระทบต่ออุปกรณ์ภายในโรงงานเมื่อนำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกเข้ามาใช้ และเพื่อตรวจสอบกับข้อบังคับ หรือ เกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้า โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะมีโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกหลายชนิด ซึ่งจำเป็นต้องทำความเข้าใจคุณลักษณะของโหลดเหล่านี้ สำหรับการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกในโรงงานมีขั้นตอนดังนี้ [10]

ขั้นตอนที่ 1 *เลือกจุด PCC* ตามปกติแล้ว จุด PCC จะอยู่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (High side) ของหม้อแปลง ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นสามารถต่อใช้ได้ ในการตรวจวัดนั้นหากทำการตรวจวัดทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูงไม่ได้ สามารถทำการตรวจวัดทางด้านแรงดันต่ำแทนได้ จากนั้นจึงแปลงไปเป็นค่าด้านแรงดันสูงด้วยสัดส่วนการแปลงของหม้อแปลงไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 *หาคุณลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น*

เนื่องจากโหลดที่กำเนิดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม มีหลายชนิด ผลกระทบโดยรวมจากฮาร์มอนิกจากหลายชุดจำเป็นต้องอาศัยการตรวจวัด เพราะกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างชนิดกันนั้นอาจมีทั้งกรณีเสริมหรือหักล้างกันได้

ขั้นตอนที่ 3 *พิจารณาถึงความจำเป็นในการใช้ชุดคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง*

ถ้าจำเป็นต้องใช้ชุดคาปาซิเตอร์เข้ามาติดตั้งเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้น จะต้องพิจารณาเกี่ยวกับเรื่องฮาร์มอนิกให้เป็นส่วนหนึ่งของการติดตั้งด้วย โดยพิจารณา

กระแสฮาร์มอนิกที่จะไหลเข้าชุดคาปาซิเตอร์ (โดยเฉพาะเมื่อเกิดสภาวะเรโซแนนซ์) และ ปริมาณแรงดันประสิทธิผล (V_{RMS}) ของชุดคาปาซิเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 *คำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นที่จุด PCC* ค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกที่ยินยอมได้ที่จุด PCC สามารถคำนวณโดยใช้ ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลด และใช้แบบจำลองของระบบอย่างง่าย

ขั้นตอนที่ 5 *ออกแบบอุปกรณ์ควบคุมปริมาณฮาร์มอนิก (ถ้าจำเป็น)* อุปกรณ์ควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกในที่นี้คือ ตัวกรองฮาร์มอนิก ซึ่งมีทั้งแบบ พาสซีฟ และ แบบแอคทีฟ ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้จะต้องพิจารณาถึงความประหยัด และเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 6 *ตรวจสอบปริมาณฮาร์มอนิกด้วยการตรวจวัด* เพื่อตรวจสอบระดับฮาร์มอนิกกับค่าจำกัดควรตรวจวัดให้ครบรอบเวลาการทำงานของโหลด ดังนั้นช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัดควรเลือกให้เพียงพอ เพื่อที่จะวิเคราะห์ถึงผลของการแปรเปลี่ยนของเวลา และคุณลักษณะทางสถิติของระดับฮาร์มอนิก

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอยู่ในขั้นตอนที่ 4 นั่นคือ การคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกภายในโรงงานโดยจะพิจารณาระบบภายในโรงงานเป็นเสมือนโครงข่ายในระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไป จากนั้นสร้างเมตริกซ์ความนำ จากแบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบของโรงงาน โดยขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

- จากระบบของโรงงานอุตสาหกรรมแปลงเป็นวงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์มอนิกตามแบบจำลองของอุปกรณ์นั้นๆ
- จากวงจรสมมูล นำค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก มาสร้าง เมตริกซ์ความนำ (Y_{BUS})
- แปลงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ถ้าพิจารณาเรื่อง แรงดันผิดเพี้ยนที่มาจากแหล่งจ่ายให้แปลงแรงดันฮาร์มอนิกเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกฉีดเข้าที่บัส PCC จากข้อมูลกระแสฮาร์มอนิก สร้างเมตริกซ์ [Ih] ได้
- หาค่า Vh ของแต่ละบัสจากสมการ $[Vh] = [Yh_{BUS}]^{-1}[Ih]$
- จาก Vh ของแต่ละบัส คำนวณหา Ih ที่ไหลในส่วนต่างๆของระบบ

เมื่อทราบ แรงดันฮาร์มอนิก ของแต่ละบัส หรือ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในส่วนต่างๆของอุปกรณ์แล้ว สามารถหาความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน (Vh_{TOTAL}) หรือ ของกระแส (Ih_{TOTAL}) ได้ดังสมการที่ (2.34 และ 2.35) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 49

$$Vh_{TOTAL} = \sqrt{\sum_{3}^{49} Vh^2} \qquad (2.34)$$

$$Ih_{TOTAL} = \sqrt{\sum_{3}^{49} Ih^2} \quad (2.35)$$

$$THD_V = \frac{Vh_{TOTAL}}{V_1} x100\% \quad (2.36)$$

$$TDD = \frac{Ih_{TOTAL}}{I_L} x100\% \quad (2.37)$$

เมื่อ Vh_{TOTAL} = แรงดันฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆในโรงงาน

Ih_{TOTAL} = กระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆในโรงงาน

Vh = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสต่างๆในโรงงาน

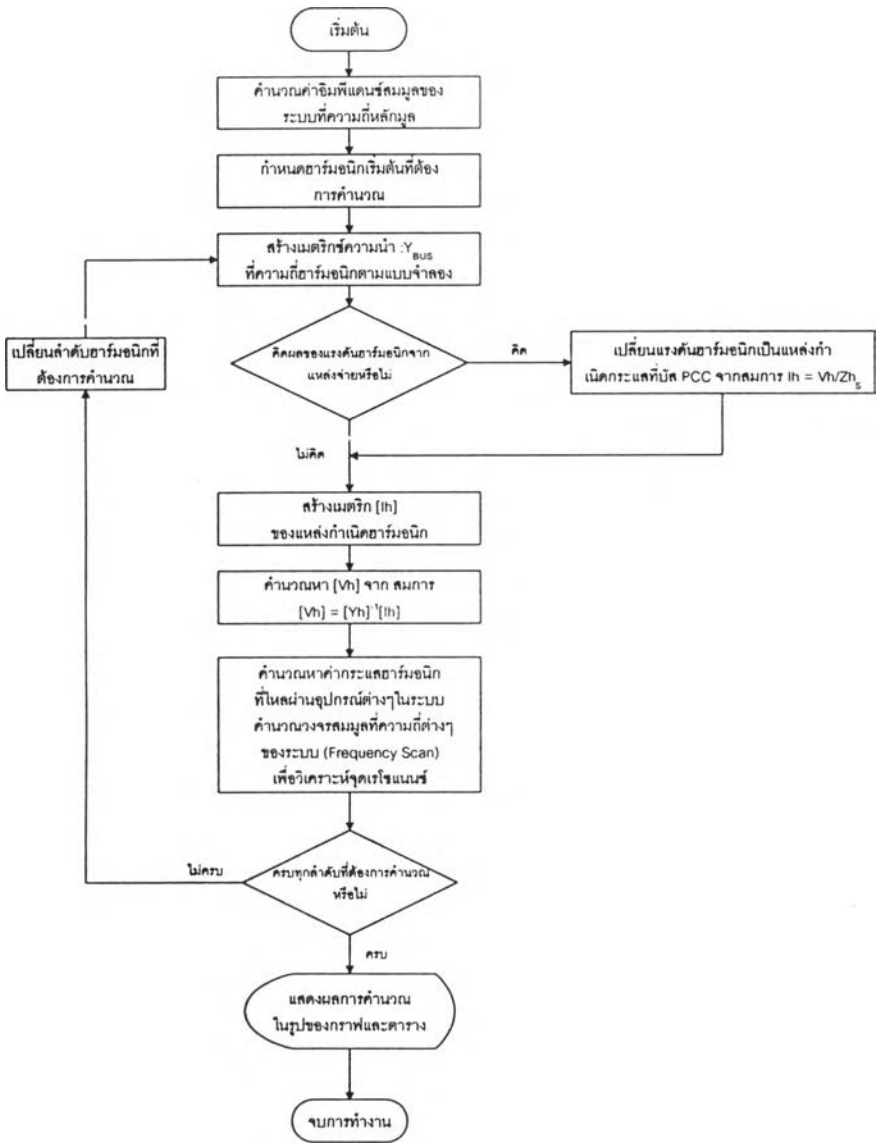
Ih = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆในโรงงาน

THD_V = ค่าผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆในโรงงาน

TDD = ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสเมื่อเทียบกับ กระแสในช่วงความต้องการสูงสุด (Maximum demand load current) ตาม IEEE Std 519-1992 (ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับมาตรฐานที่ควรศึกษาจะกล่าวถึงในบทที่ 6)

จากผลการคำนวณเมื่อต้องการเปรียบเทียบกับกฎข้อบังคับ จะพิจารณาที่ PCC บัส ทั้งในแง่ของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ หรือ ฮาร์มอนิกรวม ส่วนบัสอื่นๆจะใช้วิเคราะห์ถึงผลกระทบเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไปยังอุปกรณ์นั้นๆ จากขั้นตอนที่กล่าวมาการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 4 สามารถเขียนสรุปเป็นแผนผังสำหรับการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 2.7

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม