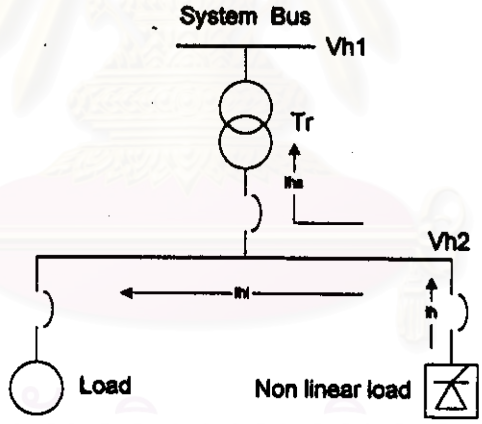
# บทที่ 2

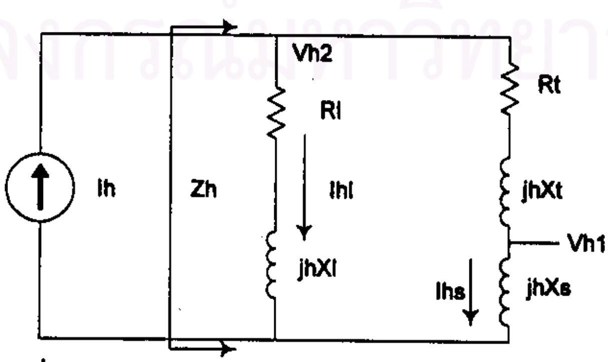
## การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจจะมีกระแสฮาร์มอนิกไหลปะปนอยู่มากมาย ทั้งที่ไหลจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ และไหลจากผู้ใช้ไฟไปยังแหล่งพลังงานไฟฟ้า ในบทนี้จะพิจารณาว่าการที่กระแสฮาร์มอนิกจะไหลไปในทิศทางใดขึ้นกับอะไรบ้าง จากที่ทราบมาแล้วว่ากระแส ฮาร์มอนิกจะถูกผลิตออกมาจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งความถี่ที่ผลิตออกมาขึ้นอยู่กับว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะผลิตฮาร์มอนิกประเภทไหน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะกำหนดให้แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกมีคุณสมบัติเป็นแหล่งกำเนิดกระแสในอุดมคติที่ความถี่ฮาร์มอนิก [8] พิจารณาระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปที่ 2.1




*รูปที่ 2.1 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก*




*รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่างในรูปที่ 2.1*

เมื่อ Rl = ค่าความต้านทานของโหลด

Xl = ค่ารีแอกแตนซ์ ( Reactance ) ของโหลดที่ความถี่หลักมูล

Rt = ค่าความต้านทานของหม้อแปลง

Xt = ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล

Xs = ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล

Ih = ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

Ihl = ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าโหลด

Ihs = ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าระบบ

Vh1 = ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 1

Vh2 = ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 2

Zh = ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่ h ที่ Ih มองเห็น

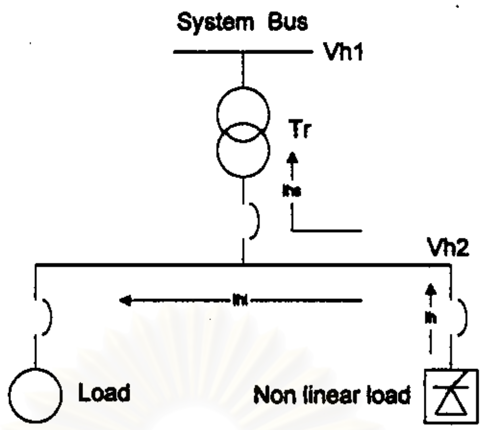
ตามปกติแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะพิจารณาเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์ก็เพียงพอ เนื่องจากว่าค่าความต้านทานถือว่ามีค่าน้อย ตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเราจะสามารถคำนวณหาค่า Zh ได้ดังนี้

$$Zh = \frac{(Rl + jhXl)(Rt + jh(Xt + Xs))}{(Rl + Rt) + jh(Xl + Xt + Xs)} \qquad (2.1)$$

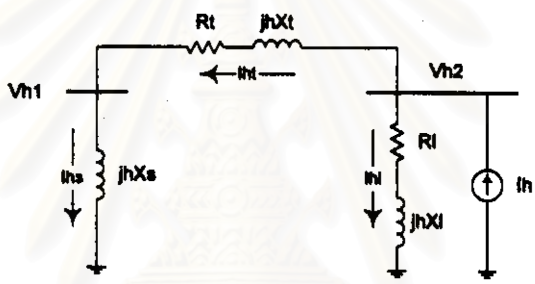
$$Vh2 = Zh \times Ih \qquad (2.2)$$

$$Ihl = \frac{Vh2}{Zl} = \frac{Rt + jh(Xt + Xs)}{(Rl + Rt) + jh(Xl + Xt + Xs)}\, Ih \qquad (2.3)$$

การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในลักษณะนี้ จะใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากการหาค่าอิมพีแดนซ์ Zh จากการยุบวงจรในกรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่ หรือมีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกหลายจุดจะทำได้ลำบาก และเกิดความไม่สะดวกอย่างมาก ดังนั้นจึงควรใช้การวิเคราะห์โดยใช้เมตริกซ์ความนำแทน ( Admittance Matrix : $Y_{BUS}$ )




*รูปที่ 2.3 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก*




*รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.3 เพื่อสร้าง $Y_{BUS}$*

จะได้ $Y_{BUS}$ ดังสมการที่ (2.4)

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhXs} + \frac{1}{Rt + jhXt} & -\frac{1}{Rt + jhXt} \\ -\frac{1}{Rt + jhXt} & \frac{1}{Rt + jhXt} + \frac{1}{Rl + jhXl} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Ih \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhXs} + \frac{1}{Rt + jhXt} & -\frac{1}{Rt + jhXt} \\ -\frac{1}{Rt + jhXt} & \frac{1}{Rt + jhXt} + \frac{1}{Rl + jhXl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vh1 \\ Vh2 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

ตามสมการที่ (2.5) สามารถหาผลเฉลยของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 1 ( Vh1) และแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 2 ( Vh2) ได้ จากนั้นจึงสามารถหาค่า Ihl , Iht และ Ihs ได้ดังนี้

$$Ihl = \frac{Vh2}{Rl + jhXl} \tag{2.6}$$

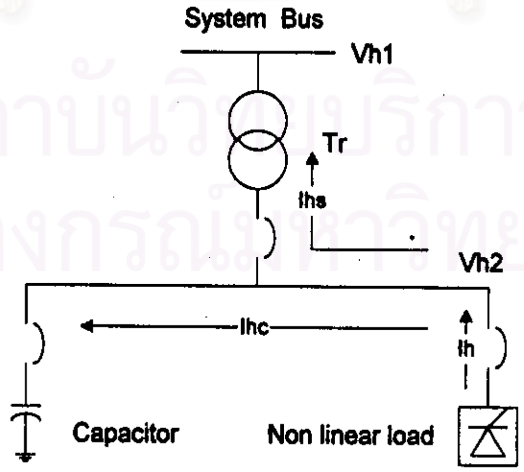
$$Iht = \frac{Vh2 - Vh1}{Rt + jhXt} \tag{2.7}$$

$$Ihs = \frac{Vh1}{jhXs} \tag{2.8}$$

ซึ่งสมการที่ (2.6) ถึงสมการที่ (2.8) หากแทนค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามสมการที่ (2.5) จะพบว่ารูปแบบสมการผลลัพธ์ที่ได้จะเหมือนกับวิธีการคำนวณแบบอาศัยการยุบวงจร เช่นกรณีผลลัพธ์ของสมการที่ (2.6) จะได้ซึ่งตรงกับสมการที่ (2.3) นั่นเอง

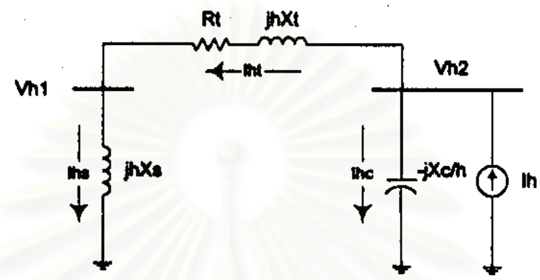
$$Ihl = \frac{Rt + jh(Xt + Xs)}{(Rl + Rt) + jh(Xl + Xt + Xs)} Ih \tag{2.3}$$

ต่อมาพิจารณากรณีที่มีการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบ ซึ่งจุดประสงค์ของการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไป อาจจะเป็นเพื่อปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้น หรือเพื่อแก้ปัญหาทางด้านกระแสฮาร์มอนิก ลองพิจารณารูปที่ 2.5




*รูปที่ 2.5 เมื่อมีคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้า*

จากระบบไฟฟ้าในรูปวงจรที่ 2.5 กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะไหลเข้าตัวคาปาซิเตอร์และไหลเข้าไปในระบบมากน้อยเพียงไร จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกนั้น ๆ การคำนวณเพื่อหาค่ากระแสฮาร์มอนิก Ihc และ Ihs ทำได้โดยการหาวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะได้ตามรูปที่ 2.6




*รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.5*

| | | | |
|---|---|---|---|
| เมื่อ | Xc | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูล |
| | Rt | = | ค่าความต้านทานของหม้อแปลง |
| | Xt | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล |
| | Xs | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล |
| | Ih | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น |
| | Ihc | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ |
| | Iht | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านหม้อแปลง |
| | Ihs | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าระบบ |
| | Vh1 | = | ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 1 |
| | Vh2 | = | ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 2 |

จะได้ $Y_{BUS}$ ดังสมการที่ (2.9)

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhXs} + \frac{1}{Rt + jhXt} & -\frac{1}{Rt + jhXt} \\ -\frac{1}{Rt + jhXt} & \frac{1}{Rt + jhXt} + \frac{1}{-j\frac{Xc}{h}} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Ih \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhXs} + \frac{1}{Rt + jhXt} & -\frac{1}{Rt + jhXt} \\ -\frac{1}{Rt + jhXt} & \frac{1}{Rt + jhXt} + \frac{1}{-j\frac{Xc}{h}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vh1 \\ Vh2 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

ทำนองเดียวกันกับการหาค่ากระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ารูปที่ 2.3 จะสามารถหาค่ากระแสฮาร์มอนิก Ihc , Iht และ Ihs ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Ihc = \frac{Vh2}{-j\frac{Xc}{h}} \tag{2.11}$$

$$Iht = \frac{Vh2 - Vh1}{Rt + jhXt} \tag{2.12}$$

$$Ihs = \frac{Vh1}{jhXs} \tag{2.13}$$

สมการที่ (2.11) ถึงสมการที่ (2.13) หากแทนค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามสมการที่ (2.10) จะได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ดังสมการที่ (2.14)

$$Ihc = \frac{Rt + jh(Xt + Xs)}{Rt + j(hXt + hXs - \frac{Xc}{h})} Ih \tag{2.14}$$

ในกรณีที่มีฮาร์มอนิกค่าหนึ่งเรียกว่า n ซึ่งมีผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบและหม้อแปลงรวมกันซึ่งเป็นอินดักตีฟรีแอกแตนซ์ มีขนาดเท่ากับค่าคาปาซิตีฟรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์นั่นคือทำให้

$$\text{Inductive Reactance} = \text{Capacitive Reactance} \tag{2.15}$$

$$n(Xt + Xs) = \frac{X_c}{n}$$

$$n = \sqrt{\frac{X_c}{(X_t + X_s)}} \tag{2.16}$$

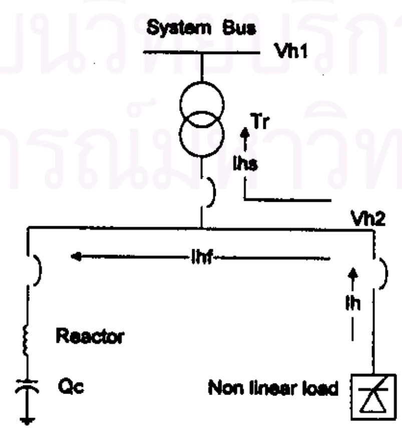
ซึ่งค่าความถี่ที่จุดนี้ ( $f_n = nf_1$ ) เราเรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ มีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของทั้งระบบที่จุดติดตั้งคาปาซิเตอร์มีค่าต่ำลงมาก หรือพิจารณาตามสมการที่ (2.14) จะพบว่าตัวส่วนของสมการที่ (2.14) จะมีค่าน้อย เพราะค่า Rt ในสมการที่ (2.14) ตามปกติมีค่าน้อยอยู่แล้วยิ่งระบบที่ใหญ่มากขึ้นค่า Rt ก็ยิ่งมีค่าน้อยลงไปอีก ดังนั้นค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ Ihc อาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Ihc \approx \{1 + \frac{jn(Xt+Xs)}{Rt}\} Ih$$

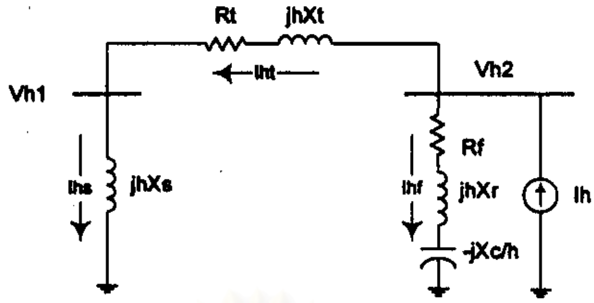
$$Ihc >> Ih \tag{2.17}$$

แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_n$ ) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวคาปาซิเตอร์จะมีค่าสูงมาก คือเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิก หากปริมาณกระแสรวมของคาปาซิเตอร์ทั้งกระแสที่ความถี่หลักมูลและกระแสฮาร์มอนิกต่าง ๆ มีค่ามากเกินไป อาจทำให้คาปาซิเตอร์ทำงานหนักเกิน เป็นผลให้เกิดการเสียหายต่อคาปาซิเตอร์จนถึงอาจเกิดการระเบิดได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงเรื่องฮาร์มอนิกด้วยหากจะนำคาปาซิเตอร์มาติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่

ในกรณีที่ไม่ต้องการให้มีการรบกวนของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า อาจจำเป็นต้องใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกเพื่อให้ตัวกรองฮาร์มอนิกรองรับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้เกือบทั้งหมด เพื่อกันไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลออกไปรบกวนระบบอื่น ๆ ดังเช่นระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.7 และจะได้วงจรสมมูลตามรูปที่ 2.8




*รูปที่ 2.7 ระบบไฟฟ้าเมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิก*




*รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.7*

| | | | |
|---|---|---|---|
| เมื่อ | Rf | = | ค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิก |
| | Xr | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ที่ความถี่หลักมูลของตัวกรอง |
| | Xc | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูลของตัวกรอง |
| | Rt | = | ค่าความต้านทานของหม้อแปลง |
| | Xt | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล |
| | Xs | = | ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล |
| | Ih | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น |
| | Ihf | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก |
| | Iht | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านหม้อแปลง |
| | Ihs | = | ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าระบบ |
| | Vh1 | = | ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 1 |
| | Vh2 | = | ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 2 |

จะได้ $Y_{BUS}$ ดังสมการที่ (2.18)

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhXs} + \frac{1}{Rt + jhXt} & -\frac{1}{Rt + jhXt} \\ -\frac{1}{Rt + jhXt} & \frac{1}{Rt + jhXt} + \frac{1}{Rf + jhXr - j\frac{Xc}{h}} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Ih \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhXs} + \frac{1}{Rt + jhXt} & -\frac{1}{Rt + jhXt} \\ -\frac{1}{Rt + jhXt} & \frac{1}{Rt + jhXt} + \frac{1}{Rf + jhXr - j\frac{Xc}{h}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vh1 \\ Vh2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

ตามสมการที่ (2.19) สามารถหาผลเฉลยของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 1 ( Vh1) และแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสที่ 2 ( Vh2) ได้ จากนั้นจึงสามารถหาค่า Ihf , Iht และ Ihs ได้ดังนี้

$$Ihf = \frac{Vh2}{Rf + jhXr - j\frac{Xc}{h}} \tag{2.20}$$

$$Iht = \frac{Vh2 - Vh1}{Rt + jhXt} \tag{2.21}$$

$$Ihs = \frac{Vh1}{jhXs} \tag{2.22}$$

สมการที่ (2.20) ถึงสมการที่ (2.22) หากแทนค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามสมการที่ (2.19) จะได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกดังนี้

$$Ihf \quad = \quad \frac{Rt + jh(Xt + Xs)}{Rt + Rf + j(hXt + hXs + hXr - \frac{Xc}{h})}\ Ih \tag{2.23}$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_n = nf_1$ ) ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะได้ $nXr = \frac{X_c}{n}$

นั่นคือ

$$Ihf \quad \approx \quad Ih \tag{2.24}$$

สมการที่ (2.24) หมายความว่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเกือบทั้งหมดจะไหลเข้าสู่ตัวกรองฮาร์มอนิก ( เฉพาะที่ความถี่เรโซแนนซ์ $n = \sqrt{\frac{Xc}{Xr}}$ )

ในกรณีของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ค่า n ที่ได้อาจจะไม่เป็นค่าที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกผลิตออกมาจริงแต่อาจจะใกล้เคียงเท่านั้น ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกบางส่วนที่มีลำดับที่ใกล้เคียงกับค่า n เท่านั้นที่จะไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก ด้วยเหตุดังกล่าวจึงไม่สามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ทั้งหมดในทุกกรณี

ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีหม้อแปลงไฟฟ้าต่ออยู่ ผลของการต่อขดลวดทั้งทางด้านแรงสูงและทางด้านแรงต่ำจะมีผลต่อการไหลของกระแสฮาร์มอนิกด้วย เนื่องจากเมื่อพิจารณาลำดับ

ฮาร์มอนิกที่เป็นลำดับที่ 3 หารลงตัว หรือที่เรียกกันว่าทริพเปิล ฮาร์มอนิก ( Triple Harmonic ) ลำดับฮาร์มอนิกนี้จะตรงกับเน็ทเวิร์คลำดับศูนย์ ( Zero Sequence Networks ) พอดี ซึ่งมีผลทำให้กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 , 6 , 9 , ... ที่ไหลอยู่ในระบบไฟฟ้า สามารถไหลผ่านหม้อแปลงได้หรือไม่ได้ จะขึ้นกับลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลง ซึ่งในรายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากตัวอย่างวงจรที่แสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวข้างต้นนั้น เป็นการนำเสนอถึงหลักการพิจารณาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกว่ามีขนาดและทิศทางการไหลอย่างไร การใช้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้ $Y_{BUS}$ พบว่ามีความสะดวกรวดเร็ว เนื่องจากสามารถเปลี่ยนองค์ประกอบของ $Y_{BUS}$ ตามชนิดของอุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าจริง