

บทที่ 2

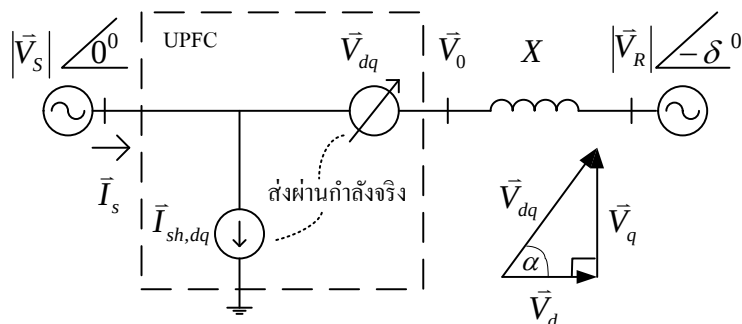
แบบจำลอง UPFC

วิธีควบคุมเวกเตอร์ (vector control) เป็นการแปลงระบบสามเฟสไปพิจารณาในแกนอ้างอิงใหม่ที่มีสองแกน วิธีการนี้สามารถแยกพิจารณาค่าจริงและค่ารีแอกทีฟได้อย่างอิสระ ทำให้การวิเคราะห์ระบบมีความง่าย ปัจจุบันมีการนำวิธีควบคุมเวกเตอร์มาใช้วิเคราะห์ในด้านระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลาย ในวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์วงจร UPFC และการควบคุม โดยอยู่บนพื้นฐานของวิธีควบคุมเวกเตอร์ และมีการวิเคราะห์ UPFC ทั้งในโดเมนความถี่ และโดเมนเวลา

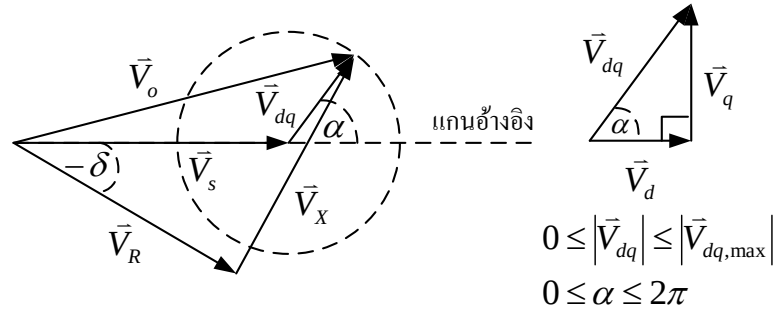
2.1 แบบจำลอง UPFC ในโดเมนความถี่

เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาการทำงานของ UPFC ที่สภาวะคงตัว และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟในสายส่ง จากรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 หากไม่คิดกระแสจากคอนเวอร์เตอร์อินพุต (อ้างอิงจากรูปที่ 1.1 ในบทที่ 1) จะได้สมการอย่างง่ายของกระแสที่ไหลในสายส่ง ดังสมการที่ (2.1)

$$\bar{I}_s = \frac{|\bar{V}_s| \angle 0^\circ + \bar{V}_{dq} - |\bar{V}_R| \angle -\delta^0}{jX} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง UPFC



รูปที่ 2.2 เฟสเซอร์การควบคุมแบบอนุกรมในสายส่ง

แทนค่าจะได้

$$\bar{I}_S = \frac{\bar{V}_S + (\bar{V}_d + j\bar{V}_q) - (|\bar{V}_R| \cos(-\delta) + j|\bar{V}_R| \sin(-\delta))}{jX} \quad (2.2)$$

และได้สมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเป็น

$$\bar{S} = \bar{V}_S \cdot \bar{I}_S^* = \bar{P} + j\bar{Q} \quad (2.3)$$

$$\bar{P} = \frac{\bar{V}_S (\bar{V}_q + |\bar{V}_R| \sin(\delta))}{X} \quad (2.4)$$

$$\bar{Q} = \frac{\bar{V}_S (\bar{V}_S + \bar{V}_d - |\bar{V}_R| \cos(\delta))}{X} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) จะเห็นได้ว่า หากแรงดันด้านส่ง ($\bar{V}_S$) แรงดันด้านรับ ($\bar{V}_R$) มุมเฟส (δ) และอิมพีแดนซ์สายส่ง (X) มีค่าคงที่ ระบบ UPFC จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง ($\bar{P}$) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ($\bar{Q}$) ได้อย่างอิสระ โดยการควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดัน $\bar{V}_{dq}$ อย่างไรก็ตามต้องเข้าใจด้วยว่า กรณีที่ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นในระบบ จะได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่บัสด้านรับได้รับจะเป็นผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าที่บัสด้านส่งมีการส่งมาในสายส่ง และกำลังไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตส่งมาเพื่อสร้างแรงดัน $\bar{V}_{dq}$ และจากรูปที่ 2.2 สังเกตว่าเมื่อแรงดัน $\bar{V}_{dq}$ เปลี่ยนไป จะส่งผลให้แรงดันคร่อมอิมพีแดนซ์สายส่ง ($\bar{V}_X$) เปลี่ยนแปลงด้วย

2.2 แบบจำลอง UPFC ในโดเมนเวลา

ในการวิเคราะห์นี้ตัวแปรระบบสามเฟสจะถูกแปลงไปยังองค์ประกอบแกน d และ q ในระบบแกน dq ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนา โดยอ้างอิงจากการวิเคราะห์แบบจำลองใน [14] การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ค่าของเวลามีหน่วยเป็นวินาที สัญลักษณ์ขีดบน (superscript) แทนค่าจริงของระบบ และกำหนดให้หม้อแปลงอนุกรมเป็นหม้อแปลงอุดมคติ

โดยที่ L_i คือ รีแอกแตนซ์รั่วไหลของหม้อแปลงขนาน

R_i คือ ความสูญเสียในการนำของคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงขนาน

L_l คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง

R_l คือ ความสูญเสียในการนำของสายส่ง

และกำหนดระบบต่อหน่วยดังนี้

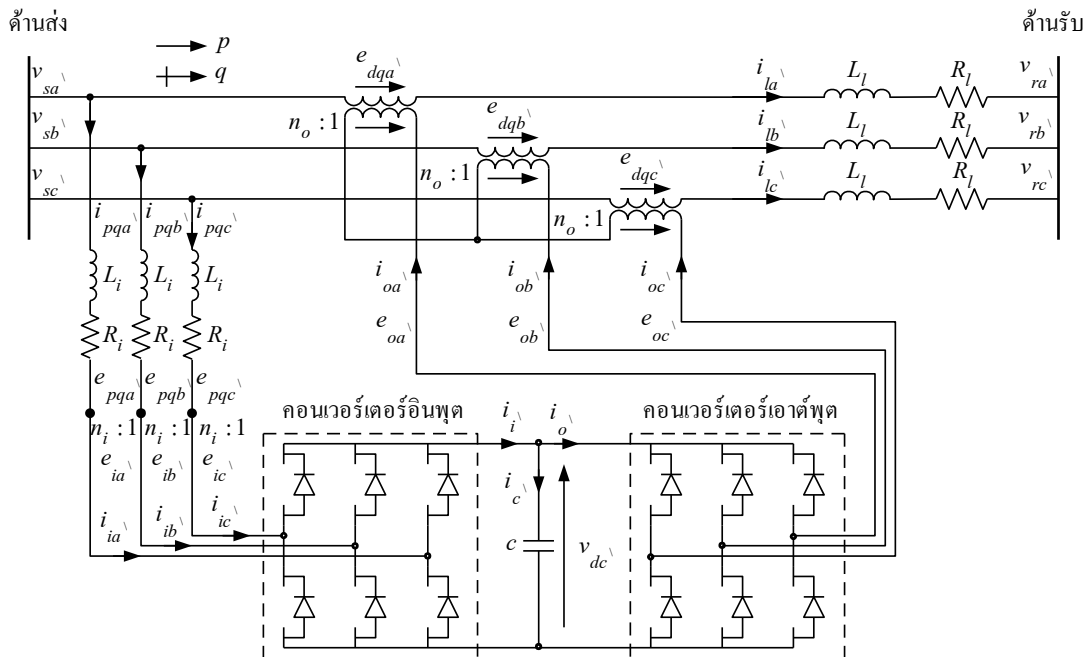
S_{base} คือ พิกัดโวลต์แอมแปร์ ของระบบสามเฟส [โวลต์แอมแปร์]

V_{base} คือ แรงดันเฟสค่ายอด [โวลต์]

$i_{base} = \frac{S_{base}}{(3/2)V_{base}}$ คือ กระแสค่ายอด [แอมแปร์]

$Z_{base} = V_{base} / i_{base}$ $i = i' / i_{base}$ $v = v' / V_{base}$ $e = e' / e_{base}$

$x = \omega_{base} L / Z_{base}$ $x_c = 1 / \omega_{base} C Z_{base}$ และ $r = R / Z_{base}$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบ UPFC และสายส่ง

2.2.1 วงจรอินพุต

จากรูปที่ 2.3 สามารถเขียนสมการวงจรอินพุตของ UPFC ในระบบต่อหน่วยได้
เป็น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pqa} \\ i_{pqb} \\ i_{pqc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_i \omega_{base}}{x_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-r_i \omega_{base}}{x_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_i \omega_{base}}{x_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pqa} \\ i_{pqb} \\ i_{pqc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_{base}}{x_i} (v_{sa} - e_{pqa}) \\ \frac{\omega_{base}}{x_i} (v_{sb} - e_{pqb}) \\ \frac{\omega_{base}}{x_i} (v_{sc} - e_{pqc}) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

พิจารณาการแปลงตำแหน่งของตัวแปรจากปริมาณสามเฟสไปที่ระนาบ dq ที่หมุนด้วยความเร็ว
ซิงโครนัส โดยใช้สมการที่ (2.7) และกำหนดให้แรงดันบัสด้านส่งอยู่บนแกน d ของระนาบนี้
แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$[T] \begin{bmatrix} i_{pqa} \\ i_{pqb} \\ i_{pqc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [T] \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |v_s| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad [T] \begin{bmatrix} e_{pqa} \\ e_{pqb} \\ e_{pqc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{pd} \\ e_{pq} \\ 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{sqq}}{v_{sdd}} \right) \quad (2.8)$$

และ

$$\begin{bmatrix} v_{sdd} \\ v_{sqq} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

สมการที่ (2.8) ใช้สำหรับหาค่ามุม θ และเมื่อหาอนุพันธ์ของ $[T]$ เทียบกับเวลาจะได้

$$\frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [T] \quad (2.10)$$

โดยที่ $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

กำหนดให้ $[I] = \begin{bmatrix} i_{pqa} \\ i_{pqb} \\ i_{pqc} \end{bmatrix}$

ใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\frac{d([T][I])}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [T][I] + [T] \frac{d[I]}{dt} \quad (2.11)$$

ทำการแปลงสมการที่ (2.6) ไปที่ระนาบ dq ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยคูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.6) ด้วย $[T]$ และแทนสมการที่ (2.11) ลงในสมการใหม่ที่ได้ แล้วจึงจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ip} \\ i_{iq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_i \omega_{base}}{x_i} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_i \omega_{base}}{x_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ip} \\ i_{iq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_{base}}{x_i} (v_s - e_{id}) \\ -\frac{\omega_{base}}{x_i} e_{iq} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรอินพุต UPFC ในระบบต่อหน่วย และอยู่ในกรอบอ้างอิง dq ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส และเมื่อคิดผลของอัตราอบของหม้อแปลงขนาน (อัตราอบเป็น $n_i:1$) จะได้สมการด้านกระแสสลับเป็น

$$\begin{bmatrix} e_{pqa} \\ e_{pqb} \\ e_{pqc} \end{bmatrix} = n_i \begin{bmatrix} e_{ia} \\ e_{ib} \\ e_{ic} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} = n_i \begin{bmatrix} i_{pqa} \\ i_{pqb} \\ i_{pqc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_{pd} \\ e_{pq} \end{bmatrix} = n_i \begin{bmatrix} e_{id} \\ e_{iq} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \begin{bmatrix} i_{id} \\ i_{iq} \end{bmatrix} = n_i \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix}$$

โดยการไม่คิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่คอนเวอร์เตอร์อินพุต จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างขนาดขององค์ประกอบเวกเตอร์แรงดันที่ชั่วกระแสสลับของคอนเวอร์เตอร์อินพุต กับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงได้เป็น

$$e_{pd} = n_i m_i v_{dc} \cos \alpha_i \quad \text{และ} \quad e_{id} = m_i v_{dc} \cos \alpha_i \quad (2.13)$$

$$e_{pq} = n_i m_i v_{dc} \sin \alpha_i \quad \text{และ} \quad e_{iq} = m_i v_{dc} \sin \alpha_i \quad (2.14)$$

กำหนด
$$m_i = \frac{\sqrt{e_{id,ref}^2 + e_{iq,ref}^2}}{v_{dc}} \quad (2.15)$$

และ
$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{e_{iq,ref}}{e_{id,ref}} \right) \quad (2.16)$$

โดยที่ α_i คือ มุมเฟสที่แตกต่างระหว่างเวกเตอร์แรงดัน e_p และเวกเตอร์แรงดัน v_s
 m_i คือ ดัชนีการผสมคลื่นของคอนเวอร์เตอร์อินพุต
 $e_{id,ref}$ คือ แรงดันควบคุมคอนเวอร์เตอร์อินพุตในแกน d ที่ได้จากระบบควบคุม
 $e_{iq,ref}$ คือ แรงดันควบคุมคอนเวอร์เตอร์อินพุตในแกน q ที่ได้จากระบบควบคุม

2.2.2 วงจรเอาต์พุต

จากวงจรคอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตจะได้สมการด้านกระแสสลับดังนี้ (เมื่อหม้อแปลงอนุกรมเป็นอุดมคติ และมีอัตรารอบเป็น $n_o : 1$)

$$\begin{bmatrix} e_{oa} \\ e_{ob} \\ e_{oc} \end{bmatrix} = n_o \begin{bmatrix} e_{dqa} \\ e_{dqb} \\ e_{dq c} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} = n_o \begin{bmatrix} i_{oa} \\ i_{ob} \\ i_{oc} \end{bmatrix}$$

สมการวงจรเอาต์พุตสามารถถูกแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงเดียวกับวงจรอินพุตจะได้

$$\begin{bmatrix} e_{od} \\ e_{oq} \end{bmatrix} = n_o \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = n_o \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix}$$

โดยการไม่คิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่คอนเวอร์เตอร์เอาต์พุต จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างขนาดขององค์ประกอบเวกเตอร์แรงดัน e_d และ e_q กับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงได้เป็น

$$e_d = n_o m_o v_{dc} \cos \alpha_o \quad \text{และ} \quad e_{od} = m_o v_{dc} \cos \alpha_o \quad (2.17)$$

$$e_q = n_o m_o v_{dc} \sin \alpha_o \quad \text{และ} \quad e_{oq} = m_o v_{dc} \sin \alpha_o \quad (2.18)$$

กำหนด
$$m_o = \frac{\sqrt{e_{od,ref}^2 + e_{oq,ref}^2}}{v_{dc}} \quad (2.19)$$

และ
$$\alpha_o = \tan^{-1} \left(\frac{e_{oq,ref}}{e_{od,ref}} \right) \quad (2.20)$$

โดยที่ α_o คือ มุมเฟสที่แตกต่างระหว่างเวกเตอร์แรงดัน e_{dq} และเวกเตอร์แรงดัน v_s
 m_o คือ ดัชนีการผสมคลื่นของคอนเวอร์เตอร์เอาต์พุต
 $e_{od,ref}$ คือ แรงดันควบคุมคอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตในแกน d ที่ได้จากตัวควบคุม
 $e_{oq,ref}$ คือ แรงดันควบคุมคอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตในแกน q ที่ได้จากตัวควบคุม

2.2.3 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง

หากไม่คิดการสูญเสียในระบบจะได้ว่ากำลังชั่วขณะที่ชั่วกระแสสลับ และกระแสตรงของคอนเวอร์เตอร์อินพุตและคอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตจะต้องเท่ากัน จึงได้สองสมการกำลังต่อหน่วยที่คู่กัน คือ $v_{dc} i_i = e_{id} i_{id} + e_{iq} i_{iq}$ และ $v_{dc} i_o = e_{od} i_{od} + e_{oq} i_{oq}$ ดังนั้นวงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงสามารถเขียนเป็นสมการต่อหน่วยได้เป็น

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \omega_{base} x_c (i_i - i_o) \quad (2.21)$$

2.2.4 วงจรสายส่ง

จากรูปที่ 2.3 สมการวงจรสายส่งสามารถเขียนในระบบต่อหน่วยได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_l \omega_{base}}{x_l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-r_l \omega_{base}}{x_l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_l \omega_{base}}{x_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_{base}}{x_l} (v_{sa} + e_{dqa} - v_{ra}) \\ \frac{\omega_{base}}{x_l} (v_{sb} + e_{dqb} - v_{rb}) \\ \frac{\omega_{base}}{x_l} (v_{sc} + e_{dqc} - v_{rc}) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

แปลงสมการที่ (2.22) โดยวิธีการเดียวกับการแปลงสมการที่ (2.6) ไปยังกรอบอ้างอิงแกน dq ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส จะได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{lp} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_l \omega_{base}}{x_l} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_l \omega_{base}}{x_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lp} \\ i_{lq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_{base}}{x_l} (v_s + e_d - v_{rd}) \\ -\frac{\omega_{base}}{x_l} (e_q - v_{rq}) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.23) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ของวงจรสายส่งในระบบต่อหน่วย และอยู่ในกรอบอ้างอิง dq ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส

2.2.5 การควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในสายส่ง

ในโหมดนี้ UPFC จะทำงานเป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า โดยการควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดัน e_{dq} จะทำให้ UPFC มีการทำงานเป็นตัวควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟระหว่างด้านส่งและด้านรับ สมมติว่า $x_l \gg r_l$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.23) จะได้องค์ประกอบกระแสในสายส่งที่สภาวะคงตัวเป็น

$$i_{lp} = \frac{\omega_{base} (e_q - v_{rq})}{\omega x_l} \quad (2.24)$$

และ

$$i_{lq} = -\frac{\omega_{base} (v_s + e_d - v_{rd})}{\omega x_l} \quad (2.25)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริง (p) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (q) ที่สามารถส่งไป ในระบบต่อหน่วยคือ

$$p = v_s i_{lp} = v_s \omega_{base} (e_q - v_{rq}) / (\omega x_l) \quad (2.26)$$

และ
$$q = -v_s i_{lq} = -v_s [-\omega_{base} (v_s + e_d - v_{rd}) / (\omega x_l)] \quad (2.27)$$

สมการที่ (2.26) แสดงให้เห็นว่า p แปรตาม e_q และสมการที่ (2.27) แสดงให้เห็นว่า q แปรตาม e_d

2.2.6 การควบคุมแรงดันบัสด้านส่งและแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง

สมมติว่า $x_i \gg r_i$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) จะได้องค์ประกอบกระแสในวงจรอินพุตที่สภาวะคงตัวเป็น

$$i_{pd} = -\frac{\omega_{base} e_{pq}}{\omega x_i} \quad (2.28)$$

และ
$$i_{pq} = \frac{\omega_{base} (-v_s + e_{pd})}{\omega x_i} \quad (2.29)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวกเตอร์องค์ประกอบแรงดันจริง e_{pd} สามารถถูกปรับค่าในเฟสเดียวกับแรงดันบัสด้านส่ง v_s เพื่อควบคุมองค์ประกอบกระแสรีแอกทีฟ i_{pq} และเวกเตอร์องค์ประกอบแรงดันรีแอกทีฟ e_{pq} สามารถถูกปรับค่าในทิศตั้งฉากกับแรงดันบัส v_s เพื่อควบคุมองค์ประกอบกระแสจริง i_{pd} ดังนั้นการควบคุมองค์ประกอบแรงดันจริง e_{pd} และองค์ประกอบแรงดันรีแอกทีฟ e_{pq} จะส่งผลให้สามารถควบคุมแรงดันบัสและแรงดันแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงได้ จากที่กล่าวมานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

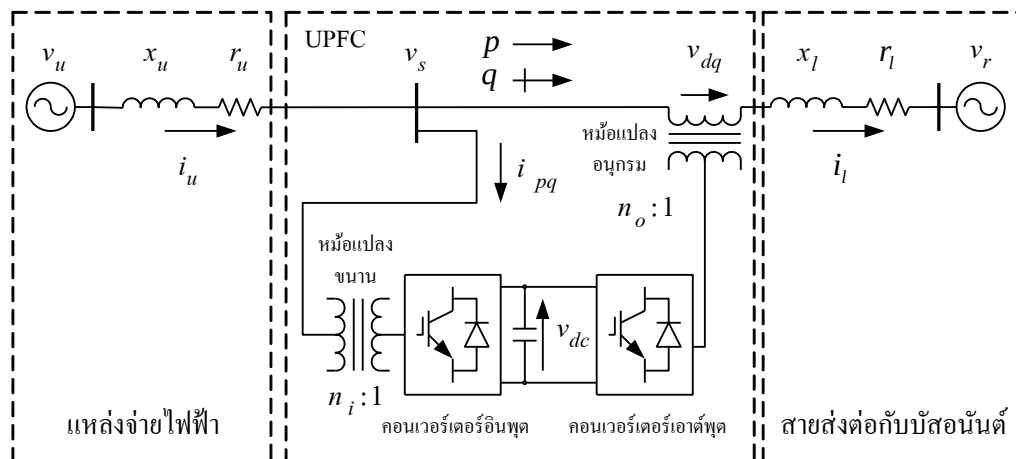
การควบคุมแรงดันบัสด้านส่ง: แรงดันบัสควรมีค่าคงที่เท่ากับค่าอ้างอิง การควบคุมองค์ประกอบแรงดันจริง e_{pd} ของคอนเวอร์เตอร์อินพุต จะทำให้องค์ประกอบกระแสรีแอกทีฟ i_{pq} เปลี่ยนแปลง แล้วจะส่งผลให้มีการรับหรือจ่ายกำลังรีแอกทีฟระหว่างคอนเวอร์เตอร์อินพุตกับบัสด้านส่งเกิดขึ้น แรงดันที่บัสด้านส่งจึงเกิดการเปลี่ยนแปลง

การควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง: การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยงหรือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นผลจากการส่งผ่านกำลังจริงระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสอง การส่งกำลังจริงผ่านตัวเก็บประจุจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสอง ในภาวะคงตัวกำลังที่คอนเวอร์เตอร์เอาต์พุตต้องการจะเท่ากับกำลังที่คอนเวอร์เตอร์อินพุตป้อนให้ ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ ดังนั้นการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจึงเป็นเสมือน การควบคุมกำลังจริงที่คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองมีการรับและจ่ายให้มีความสมดุล การควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทำได้โดยควบคุมองค์ประกอบแรงดันรีแอกทีฟ e_{pq} ของคอนเวอร์เตอร์อินพุต ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบกระแสจริง i_{pd} เปลี่ยนแปลง แล้วจะส่งผลให้มีการรับหรือจ่ายกำลังจริงระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองเปลี่ยนแปลง

2.2.7 การเชื่อมต่อ UPFC กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

เนื่องจาก UPFC จะถูกติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์จึงกำหนดให้ UPFC ถูกติดตั้งเชื่อมโยงระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและระบบสายส่งที่ต่อกับบัสอนันต์ ดังรูปที่ 2.4 จากรูปสามารถแบ่งระบบได้เป็นสามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า ส่วนที่สองเป็น UPFC และส่วนที่สามเป็นระบบสายส่งกับบัสอนันต์ เมื่อวิเคราะห์ส่วนที่หนึ่งด้วยวิธีการในหัวข้อ 2.2.1 จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนแบบจำลองอย่างง่ายของโรงจักรไฟฟ้าในระบบต่อหน่วยเป็น

$$\begin{bmatrix} v_{ud} - v_s \\ v_{uq} \end{bmatrix} = \frac{x_u}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ud} \\ i_{uq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -r_u & x_u \\ -x_u & -r_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ud} \\ i_{uq} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของ UPFC ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง

สมการที่ (2.30) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาแรงดันภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้าและแรงดันบัสด้านส่งที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณค่าเริ่มต้นของแรงดันภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้า : สมมติให้รู้ค่าของตัวแปร r_u และ x_u สำหรับค่าของกระแสและแรงดันบัสดำเนินได้มาจากค่าเริ่มต้นของ UPFC และเนื่องจากที่ภาวะคงตัวเทอม $di/dt=0$ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.30) ก็จะได้ v_{ud} และ v_{uq} แล้วคำนวณหาขนาดแรงดันภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้า (v_u) ได้จากสมการที่ (2.31) และหามุมเฟสของแรงดันในแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ϕ) ได้จากสมการที่ (2.32)

$$v_u = \sqrt{v_{ud}^2 + v_{uq}^2} \quad (2.31)$$

และ
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{v_{uq}}{v_{ud}} \right) \quad (2.32)$$

การคำนวณหาแรงดันบัสด้านส่งที่เปลี่ยนแปลง : เนื่องจากที่สภาวะชั่วคราว ผลกระทบจากพฤติกรรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดันบัสด้านส่ง (v_s) มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในการวิเคราะห์กำหนดให้แรงดันบัสด้านส่งมีมุมอ้างอิงเป็นศูนย์ ดังนั้นจากข้อกำหนดดังกล่าวจะทำให้มองเห็นว่ามุมเฟสของแรงดันภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้าเปลี่ยน (ขนาดแรงดันภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง) ในการวิเคราะห์ได้สมมติค่าตัวแปร x_u และ r_u ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และกำหนดให้แรงดันบัสด้านส่ง (v_s) เป็นหนึ่งหน่วย การหาสภาวะเริ่มต้นของแรงดันภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้าทำได้โดยแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ (2.30) เพื่อหา v_{uq} แล้วแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทราบค่าลงในสมการที่ (2.33) เพื่อหามุมเฟสของแรงดันในแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ϕ) ที่เปลี่ยนแปลง

$$v_{uq} = v_u \sin \phi \quad (2.33)$$

ต่อมาให้แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (2.31) หรือ (2.32) เพื่อหาค่า v_{ud} แล้วจึงคำนวณหา v_s ที่เปลี่ยนแปลงได้จากสมการที่ (2.30)