หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ตัวเลื่อนเฟส

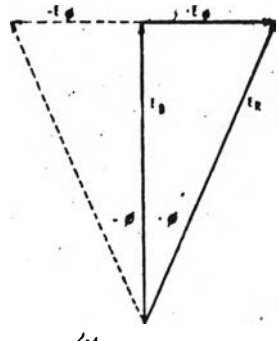
3.1 บทนำ

ในระบบไฟฟ้ากำลังระบบหนึ่งๆนั้นจะต้องประกอบไปด้วยหม้อแปลง (Transformer)ไม่มากก็น้อยตัว โดยหม้อแปลงนั้นจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าเข้าไปในสายส่ง(Transmission Line) เพื่อส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังจุดที่ต้องการ หม้อแปลงนั้นมีหลายแบบหลายชนิดเพื่อทำหน้าที่เฉพาะอย่างแตกต่างกันตามความต้องการของการใช้งานเช่น หม้อแปลงออโต(Auto Transformer) หม้อแปลงOLTC(On Load Tap Change Transformer) ฯลฯ ซึ่งหม้อแปลงเหล่านี้จะมีแทป(Tap)เพื่อให้สามารถปรับขนาดแรงดันให้ได้ตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีหม้อแปลงอีกชนิดหนึ่งที่หน้าที่หลักของมันไม่ใช้การปรับขนาดของแรงดันแต่จะทำหน้าที่ปรับขนาดมุมของแรงดันให้เป็นไปตามที่ต้องการเพื่อจุดประสงค์ต่างๆหม้อแปลงชนิดนี้เราเรียกว่า หม้อแปลงเลื่อนเฟส(Phase Shifting Transformer)หรือบางครั้งนิยมเรียกสั้นๆว่า ตัวเลื่อนเฟส(Phase Shifter) ซึ่งหน้าที่หลักของตัวเลื่อนเฟสก็คือการปรับแปลงขนาดของมุมของแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามค่าที่ต้องการ เพื่อจุดประสงค์หลักคือการควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่งที่ตัวมันติดตั้งอยู่ให้เป็นไปตามแนวทางที่ต้องการทั้งนี้ก็เนื่องจากดังที่ทราบกันว่าขนาดของแรงดันมีผลอย่างมากต่อกำลังรีแอคทีฟแต่มีผลน้อยต่อกำลังจริง ขณะที่ขนาดของมุมของแรงดันมีผลอย่างมากต่อกำลังจริงแต่มีผลน้อยต่อกำลังรีแอคทีฟ ดังนั้นเมื่อเราสามารถควบคุมขนาดของมุมของแรงดันได้เราก็สามารถควบคุมกำลังจริงได้ การที่เราสามารถควบคุมกำลังจริงได้นั้นมีประโยชน์ในหลายๆด้านดังจะกล่าวถึงต่อไป นอกจากหม้อแปลงทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้นแล้วก็ยังมีหม้อแปลงอีกประเภทหนึ่งที่รวมเอาคุณสมบัติของการควบคุมขนาดแรงดันและขนาดของมุมของแรงดันไว้ในตัวเดียวกันด้วย

3.2 วงจรไฟฟ้าและหลักการทำงานของตัวเลื่อนเฟส [6,10]

หลักการทำงานของตัวเลื่อนเฟสนั้นสามารถอธิบายอย่างง่ายๆก็คือ

ตัวเลื่อนเฟสจะทำตัวเองเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันที่สร้างแรงดันที่มีมุมต่าง 90 องศากับมุมของแรงดันของสายส่งที่มันต่ออยู่ และใส่แรงดันที่มีมุมต่าง 90 องศานี้เข้าไปในสายส่งที่ต้องการควบคุม โดยแรงดันมุมต่าง 90 องศานี้จะเข้าไปรวมกันทางเวคเตอร์กับแรงดันเดิมก่อให้เกิดแรงดันใหม่ที่มีมุมของแรงดันเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่วนขนาดของแรงดันนั้นก็จะเปลี่ยนแปลงไปเช่นกันแต่เป็นขนาดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากเมื่อมุมที่เปลี่ยนไปมีค่าไม่สูงมากนัก การรวมตัวกันของเวคเตอร์แรงดันทั้ง 2 เพื่อให้เกิดแรงดันใหม่ที่มีมุมต่างไปจากเดิมเป็นค่า ϕ นี้สามารถอธิบายได้ด้วยเวคเตอร์ไดอาแกรมดังรูปที่ 3.1

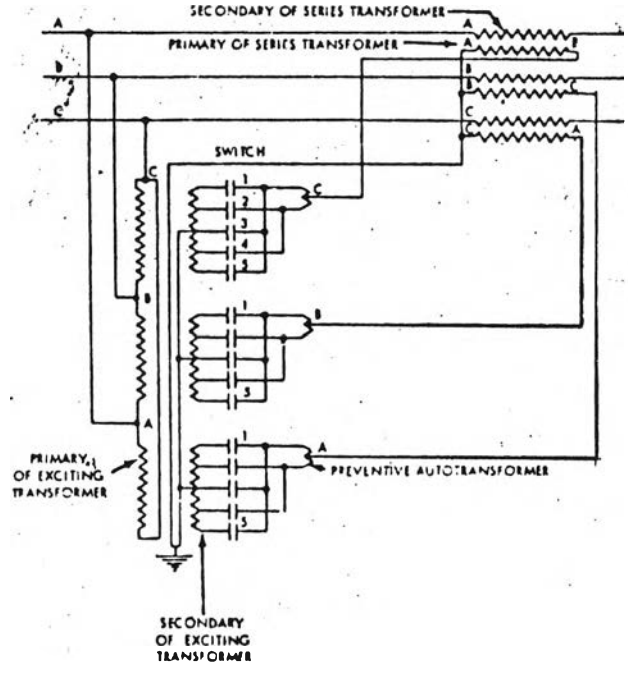


รูปที่ 3.1 เวคเตอร์ไดอาแกรมแสดงหลักการควบคุมมุม

จากรูปที่ 3.1 แรงดัน E_s เป็นแรงดันอ้างอิงที่ต้องการเปลี่ยนขนาดของมุม ซึ่งเมื่อถูกรวมทางเวคเตอร์กับแรงดัน E_ϕ ที่มีมุมต่างกับ E_s อยู่ 90 องศาแล้วจะทำให้เกิดแรงดันลัพย์ใหม่คือแรงดัน E_r ที่มีมุมเลื่อนจากเดิมไปเป็นมุม ϕ ซึ่งแรงดัน E_ϕ นี้ก็คือแรงดันที่สร้างจากตัวเลื่อนเฟส โดยขนาดและทิศทางของแรงดัน E_ϕ นี้จะเป็นตัวควบคุมหรือกำหนดขนาดและทิศทางของมุม ϕ เราเรียกแรงดัน E_ϕ ที่มีมุมต่าง 90 องศากับแรงดันอ้างอิงนี้ว่า แรงดันมุมต่าง 90 องศา (Quadrature Voltage) โดยแรงดันมุมต่าง 90 องศานี้เราจะสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและทิศทาง(เป็นบวกหรือลบ) ซึ่งทำให้เราสามารถควบคุมทั้งขนาดและทิศทาง(เป็นบวกหรือลบ)ของมุม ϕ ได้ ดังในรูปที่ 3.1 เมื่อเวคเตอร์ E_ϕ มีขนาดมากขึ้นในทิศทางที่เป็นบวกแล้วจะทำให้มุม ϕ มีขนาดมากขึ้นในทิศทางที่เป็นบวกด้วย เราเรียกมุม ϕ นี้ว่า มุมเลื่อนเฟส(Phase Shift Angle)

สำหรับวงจรไฟฟ้าและหลักการทำงานของตัวเลื่อนเฟสพิจารณาได้จากรูปที่ 3.2 โครงสร้างทางวงจรไฟฟ้าของตัวเลื่อนเฟสประกอบไปด้วยหม้อแปลง 3 เฟส 2 ตัว โดยตัวที่หนึ่งเรียกว่า หม้อแปลงกระตุ้น (Exciting Transformer) ตัวที่สองเรียกว่าหม้อแปลงอนุกรม(Series Transformer) ด้านปฐมภูมิ(Primary)ของหม้อแปลงกระตุ้นต่อแบบ Δ และด้านทุติยภูมิ(Secondary)ต่อแบบ Y โดยมี neutral ต่ออยู่ตรงกลางของขดลวดแต่ละขด

ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระตุ้นนี้จะต่อเข้ากับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงอนุกรม และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมนี้จะต่อเข้ากับสายส่งเพื่อส่งแรงดันมุมต่าง 90 องศาเข้าไปเพื่อรวมกันทางเวคเตอร์กับแรงดันอ้างอิงที่สายส่งเพื่อให้ได้แรงดันที่มีมุมเลื่อนเฟสตามที่ต้องการ

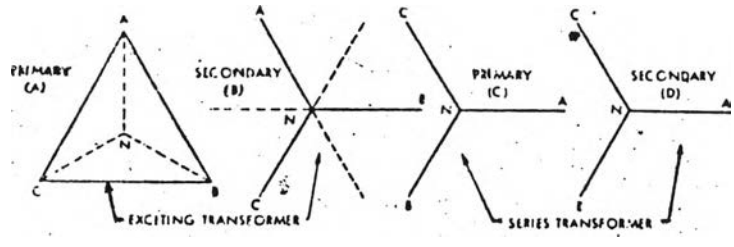


รูปที่ 3.2 วงจรไฟฟ้าแบบหนึ่งของตัวเลื่อนเฟส

หลักการทำงานเพื่อสร้างแรงดันมุมต่าง 90 องศาขึ้นทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มจากด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระตุ้นนำแรงดันจากสายส่งเข้ามาในตัวและเมื่อผ่านออกทางทุติยภูมิของตัวมันจะก่อให้เกิดมีมุมเลื่อนของแรงดันขึ้น 30 องศา ทั้งนี้เนื่องมาจากหม้อแปลงกระตุ้นมีการต่อภายในเป็นแบบ Δ - Y จากนั้นหม้อแปลงกระตุ้นจะส่งแรงดันนี้ในลำดับเฟส A, B และ C ไปยังหม้อแปลงอนุกรมที่ต่ออยู่กับสายส่งที่ต้องการควบคุมโดยมีการต่ออยู่ในลำดับเฟส B,C และ A ตามลำดับ นั้นคือเฟส A ของหม้อแปลงกระตุ้นจะต่อเข้ากับเฟส B ของหม้อแปลงอนุกรมที่ต่ออยู่กับเฟส B ของสายส่ง ส่วนเฟส B และ C ของหม้อแปลงกระตุ้นก็ต่อเรียงลำดับเฟสกันเช่นนี้เรื่อยๆไป การที่ต่อลำดับเฟสสลับเช่นนี้ทำให้เกิดมุมต่างของแรงดันอยู่ 120 องศาและเมื่อรวมกับผลของการมีมุมเลื่อนของแรงดัน 30 องศาจากหม้อแปลงกระตุ้นแล้ว มุมของแรงดันที่ไปปรากฏทางทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมจะมีมุมต่าง 90 องศากับมุมของแรงดันของสายส่งที่ต่ออยู่ ซึ่งนั่นคือเราสร้างแรงดันมุมต่าง 90 องศา (Quadrature Voltage) ขึ้นเพื่อใส่เข้าไปรวมกันทางเวคเตอร์กับแรงดันอ้างอิงในสายส่ง เพื่อให้ได้แรงดันใหม่ที่มีมุมเลื่อนเฟส(ϕ)ตามต้องการ

ขนาดและทิศทางของมุม ϕ นี้สามารถควบคุมได้จากขนาดและทิศทางของแรงดันที่เข้ามาทางปฐมภูมิของหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งสามารถควบคุมได้จากระบบวงจรควบคุมแรงดันที่ต่ออยู่ระหว่างด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระตุ้นกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงอนุกรม ดังในรูปที่ 3.2 นี้สวิทช์ 1 ถึง 5 ที่ปลายแต่ละขดของขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระตุ้นจะทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดันที่จะส่งให้แก่หม้อแปลงอนุกรม เช่นเมื่อสวิทช์ 1ปิดจะทำให้แรงดันที่ส่งออกไปมีค่าเป็นบวกมากที่สุดซึ่งทำให้ได้ค่ามุม ϕ เป็นบวกมากที่สุด หรือเมื่อสวิทช์ 3 ปิดจะไม่มีแรงดันส่งออกมาทำให้ไม่เกิดมุมเลื่อนเฟสขึ้น และเช่นเดียวกันเมื่อสวิทช์ 5 ปิดจะทำให้แรงดันที่ส่งออกมามีค่าเป็นลบมากที่สุดส่งผลให้เกิดมุม ϕ เป็นค่าลบมากที่สุด โดยปรกติขนาดของแรงดันทั้งทางด้านบวกและลบที่ได้ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมจะมีค่าอยู่ในช่วงราว 10 เปอร์เซนต์ของ line voltage สำหรับวงจรระบบควบคุมแรงดันนั้นถ้าการออกแบบระบบวงจรควบคุมแรงดันส่วนนี้ให้เหมาะสมแล้วเราจะสามารถควบคุมมุม ϕ ให้มีค่าเท่าใดก็ได้ตามต้องการ

ส่วนลำดับการเปลี่ยนแปลงมุมของเวคเตอร์แรงดันที่เกิดขึ้นเพื่อสร้างแรงดันมุมต่าง 90 องศานั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ดังนี้

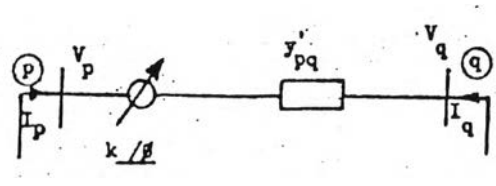


รูปที่ 3.3 เวคเตอร์ไดอาแกรมของแรงดันจากวงจรรูปที่ 3.2

รูป A คือเวคเตอร์ไดอาแกรมของแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระตุ้นซึ่งได้มาจากแรงดันของสายส่ง รูป B คือเวคเตอร์ไดอาแกรมของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระตุ้นซึ่งมีการต่อภายในแบบ Δ - Y ทำให้เกิดมุมเลื่อนขึ้น 30 องศา รูป C คือเวคเตอร์ไดอาแกรมของแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงอนุกรม ซึ่งมุมของแรงดันถูกเลื่อนไป 120 องศาเนื่องจากการต่อสลับเฟส รูป D คือเวคเตอร์ไดอาแกรมของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมซึ่งพบว่ามีมุมต่างกับรูป A อยู่ 90 องศา ซึ่งก็คือเราได้แรงดันมุมต่าง 90 องศาออกมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมนั้นเอง

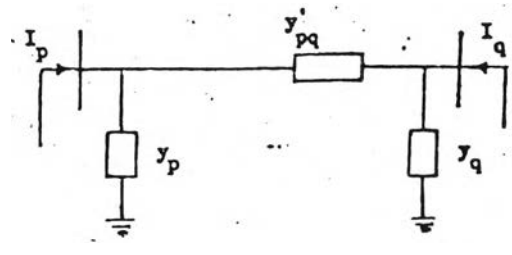
3.3 วงจรสมมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6,7]

วงจรสมมูลของตัวเลื่อนเฟสที่ติดตั้งในสายส่งระหว่างบัส p และบัส q แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของตัวเลื่อนเฟส

โดยวงจรสมมูลนี้สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลที่ปรับปรุงใหม่อีกแบบหนึ่ง[7]ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจากวงจรรูปที่ 3.5 นี้เราจะสามารถสร้างรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) เพื่อแสดงผลของตัวเลื่อนเฟสที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของตัวเลื่อนเฟสที่ปรับปรุงใหม่

วงจรสมมูลดังกล่าวนี้จะแสดงผลของตัวเลื่อนเฟสในรูปของแอดมิตแตนซ์ต่อขนาน(Shunt Admittance) 2 ตัว โดยแต่ละตัวต่ออยู่ทางปลายสายส่งของสายส่งที่ตัวเลื่อนเฟสติดตั้งอยู่ดังเช่นในรูปที่ 3.5 เมื่อตัวเลื่อนเฟสติดตั้งในสายส่งระหว่างบัส p และบัส q ก็จะสามารถแทนได้ด้วยแอดมิตแตนซ์ต่อขนาน 2 ตัว ทางปลายบัส p และบัส q โดยแอดมิตแตนซ์ต่อขนานทางบัส p เรากำหนดให้เป็น y_p และทางบัส q เรากำหนดให้เป็น y_q โดยค่าของ y_p และ y_q เป็นไปตามสมการ

$$y_p = y'_{pq} * [(1/k^2)-1+(1-1/k\angle\phi) * V_q/V_p] \quad (3.1)$$

$$y_q = y'_{pq} * [(1-1/k\angle-\phi) * V_p/V_q] \quad (3.2)$$

โดย y'_{pq} คือแอดมิตแตนซ์อนุกรมของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส p-q

k คือสัมประสิทธิ์การแปลงของขนาดแรงดัน

ϕ คือมุมของตัวเลื่อนเฟส

V_p, V_q คือเวคเตอร์ของแรงดันที่บัส p และ q ตามลำดับ

แอดมิตแตนซ์ต่อขนานทั้ง 2 ตัวนี้สามารถแสดงผลของตัวเลื่อนเฟสได้โดยการรวมผลของแอดมิตแตนซ์ต่อขนานทั้ง 2 ตัวนี้เข้ากับแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ (Y_{bus}) ของระบบ โดยคิดเสมือนว่าแอดมิตแตนซ์ทั้ง 2 ตัวนี้เป็นเหมือนค่าไลน์ชาร์จจิ่งของสายส่งที่คิดรวมเข้าไปในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ โดยเมื่อเรารวมผลของตัวเลื่อนเฟสในรูปของแอดมิตแตนซ์ต่อขนานทั้ง 2 ตัวนี้เข้าไปในระบบแล้ว เราจะได้รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเลื่อนเฟสที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัสและแรงดันบัสดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_{pq}+y_p & -y'_{pq} \\ -y_{pq}' & y_{pq}'+y_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

จากรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวนี้ เราจะพบว่าในขั้นตอนขณะทำการคำนวนโหลดโฟลว์นั้นผลของตัวเลื่อนเฟสที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้ถูกแสดงออกมาในรูปของการที่มีสมาชิกบ้างตัวของแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์(Y_{bus})ของระบบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยถ้าเราติดตั้งตัวเลื่อนเฟสในสายส่งระหว่างบัส p และบัส q แล้ว สมาชิกของแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปจะอยู่ในตำแหน่ง pp และ qq โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ y_p และ y_q ตามลำดับ หรือถ้าเราทำการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 2 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส p-q และ i-j แล้ว สมาชิกของแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ที่ตำแหน่ง pp,qq,ii และ jj ก็จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นั่นคือจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแนวเส้นทแยงมุมของแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์เท่านั้น โดยสมาชิกนอกแนวเส้นทแยงมุมจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นและยังสมมาตรกันอยู่ ซึ่งทำให้สามารถทำการคำนวนโหลดโฟลว์ด้วยวิธีปรกติแบบเดิมได้ เพราะถ้าสมาชิกของแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ไม่สมมาตรกันแล้วจะคำนวนโหลดโฟลว์ด้วยวิธีปรกติแบบเดิมไม่ได้ ซึ่งนี่คือข้อดีข้อหนึ่งของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์แบบนี้ ส่วนค่าของ y_p และ y_q จากสมการที่ (3.1)และ(3.2) เราพบว่าค่าของy_p และ y_q จะเป็นฟังก์ชั่นของ k,ϕ,V_p และ V_q ซึ่งในแต่ละรอบของการคำนวนโหลดโฟลว์ค่าของ y_p และ y_q จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ทั้งนี้เพราะในแต่ละรอบของการคำนวน ค่าแรงดันที่บัสต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการคำนวนในแต่ละรอบ จนเมื่อการคำนวนโหลดโฟลว์เสร็จสิ้นลงเราก็จะได้คำตอบของการคำนวนโหลดโฟลว์ที่รวมผลของตัวเลื่อนเฟสอยู่ด้วย

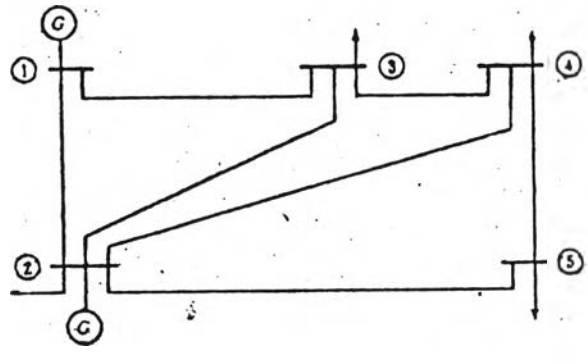
ดังที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าเราทราบค่ามุมเลื่อนเฟสของตัวเลื่อนเฟสที่แน่นอนแล้ว เราก็จะสามารถสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ของระบบที่รวมผลของตัวเลื่อนเฟสเข้าไปในระบบแล้วได้ ซึ่งเราก็สามารถใช้แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์นี้ไปคำนวนโหลดโฟลว์ด้วยวิธีเดิมได้ตามปรกติ ซึ่งโดยความหมายก็คือการที่ตัวเลื่อนเฟสมีมุมเลื่อนเฟสเป็น ϕ นี้มีผลทำให้แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมไปเป็นค่าใหม่ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการไหลของกำลังในสายส่งต่างๆไปเป็นค่าใหม่ ซึ่งก็คือการควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่งด้วยมุมเลื่อนเฟสจากตัวเลื่อนเฟสนั้นเอง

3.4 ผลของตัวเลื่อนเฟสที่มีต่อการควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่ง

เมื่อเรารวมผลของตัวเลื่อนเฟสตามรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเข้ากับการคำนวนโหลดโฟลว์เดิมโดยการปรับปรุงบางจุดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ขั้นตอนในการสร้างแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ ขั้นตอนในการคำนวนจาโคเบียนเมทริกซ์ ฯลฯ เราจะได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำการคำนวนโหลดโฟลว์โดยรวมผลของตัวเลื่อนเฟสเข้าไปในระบบได้ด้วยซึ่งผลของตัวเลื่อนเฟสที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังสามารถสรุปได้จากการทำโหลดโฟลว์ดังนี้

3.4.1 ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดลองเป็นระบบ 5 บัส 7 สายส่งของ IEEE มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 และมีข้อมูลของระบบดังนี้



รูปที่ 3.6 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

** BUS DATA **

bus no.	bus type	volt (pu)	deg	volt base (kv)	generation MW	generation MVAR	load MW	load MVAR
1	3	1.06000	.00	230.00	.00	.00	.00	.00
2	2	1.00000	.00	230.00	40.00	30.00	20.00	10.00
3	1	1.00000	.00	230.00	.00	.00	45.00	15.00
4	1	1.00000	.00	230.00	.00	.00	40.00	5.00
5	1	1.00000	.00	230.00	.00	.00	60.00	10.00

type = 1 -------> LOAD BUS

type = 2 -------> VOLTAGE CONTROLLED BUS

type = 3 -------> SWING BUS

** LINE DATA **

line no.	send bus (p)	end bus (q)	impedance r	impedance x	line charging (pu)
1	1	2	.0200	.0600	.0000
2	1	3	.0800	.2400	.0000
3	2	3	.0600	.1800	.0000
4	2	4	.0200	.1800	.0000
5	2	5	.0800	.1200	.0000
6	3	4	.0100	.0300	.0000
7	4	5	.0300	.2400	.0000

** LIMIT OF BUS VOLTAGE AND GEN.REACTIVE **

bus	voltage		Q - generate	
	max.	min.	max.	min.
no.	(pu)		(MVAR)	
1	1.10	1.00	100.00	-20.00
2	1.05	1.00	100.00	-45.00
3	1.00	.90	.00	.00
4	1.00	.90	.00	.00
5	1.00	.90	.00	.00

3.4.2 ผลของการคำนวนโหลดโฟลว์ของระบบทดสอบ

การคำนวนดโหลดโฟลว์ของระบบทดสอบที่ภาวะปรกติ ไม่มีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสที่สายส่งใดๆจะได้ผลดังนี้

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus	bus	bus voltage			generation		load	
no.	type	pu	kv	deg.	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3	1.0600	243.80	.00	132.22	99.83	.00	.00
2	2	1.0000	230.00	-2.09	40.00	-40.57	20.00	10.00
3	1	.9801	225.39	-4.58	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.9761	224.57	-4.90	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.9521	218.96	-5.83	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line	from bus	to bus	flow from bus p		flow to bus q		line loss		line charg.
no.	p	q	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1	2	90.12	77.13	-87.62	-69.62	2.50	7.51	.00
2	1	3	42.09	22.70	-40.46	-17.82	1.63	4.89	.00
3	2	3	24.75	3.40	-24.37	-2.28	.37	1.12	.00
4	2	4	27.80	10.68	-27.62	-9.09	.18	1.60	.00
5	2	5	55.08	4.97	-52.63	-1.30	2.45	3.67	.00
6	3	4	19.64	5.09	-19.79	-4.96	.04	.13	.00
7	4	5	7.41	9.05	-7.37	-8.70	.04	.34	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	172.22	59.26
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	7.2182	19.2641
mismatch	.0003	.0007

*** POWER LOSS IN BASE CASE = 7.2182 MW ***

3.4.3 ผลของการคำนวนโหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวเลื่อนเฟส

การคำนวนโหลดโฟลว์ของระบบทดสอบเมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟส 1 ตัวที่สายส่งระหว่างบัส 2 และบัส 5 โดยมีการกำหนดมุมของตัวเลื่อนเฟส(ϕ)เป็น 2 กรณีได้ผลของการคำนวนโหลดโฟลว์ดังนี้

ก. เมื่อมุม ϕ_{25} = 1.5 องศา

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus	bus	bus voltage			generation		load	
no.	type	pu	kv	deg.	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3	1.060	248.80	.00	132.63	99.71	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-2.14	40.00	-40.16	20.00	10.00
3	1	.980	225.37	-4.42	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.976	224.53	-4.69	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.949	218.31	-4.84	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line	from bus	to bus	flow from bus p		flow to bus q		line loss		line charg.
no.	p	q	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1	2	91.58	76.71	-89.04	-69.09	2.54	7.62	.00
2	1	3	41.05	28.00	-39.47	-18.27	1.58	4.73	.00
3	2	3	28.00	8.95	-22.67	-2.97	.33	.98	.00
4	2	4	25.38	10.94	-25.23	-9.56	.15	1.37	.00
5	2	5	60.66	4.04	-57.70	.40	2.96	8.64	.00
6	3	4	17.15	6.24	-17.11	-6.14	.03	.10	.00
7	4	5	2.34	10.70	-2.30	-10.40	.04	.30	.00

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	172.63	59.55
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	7.6251	18.7470
mismatch	.0029	.7984

** POWER LOSS IS = 7.6251 MW **

ข. เมื่อมุม $\phi_{2s} = -1.5$ องศา

*** VOLTAGE AND POWER GENERATION ***

bus no.	bus type	bus voltage pu	bus voltage kv	deg.	generation MW	generation MVAR	load MW	load MVAR
1	3	1.060	243.90	.00	131.91	99.97	.00	.00
2	2	1.000	230.00	-2.04	40.00	-40.69	20.00	10.00
3	1	.980	225.39	-4.73	.00	.00	45.00	15.00
4	1	.976	224.59	-5.11	.00	.00	40.00	5.00
5	1	.955	219.57	-6.82	.00	.00	60.00	10.00

*** LINE FLOW ***

line no.	from bus p	to bus q	flow from bus p MW	flow from bus p MVAR	flow to bus q MW	flow to bus q MVAR	line loss MW	line loss MVAR	line charg. MVAR
1	1	2	88.74	77.54	-86.27	-70.12	2.47	7.42	.00
2	1	3	43.16	22.43	-41.48	-17.38	1.68	5.05	.00
3	2	3	26.51	2.89	-26.08	-1.61	.43	1.28	.00
4	2	4	30.22	10.49	-30.02	-8.65	.20	1.84	.00
5	2	5	49.54	6.05	-47.55	-3.06	1.99	2.99	.00
6	3	4	22.56	3.99	-22.50	-3.83	.05	.16	.00
7	4	5	12.52	7.48	-12.45	-6.94	.07	.54	.00

1173324836

*** TOTAL SYSTEM SOLUTION ***

	MW	MVAR
system generation	171.91	59.28
system load	165.00	40.00
line charging	.00	.00
shunt capacitor	.00	.00
system loss	6.9022	19.2804
mismatch	.0033	.0002

** POWER LOSS IS = 6.9022 MW **

3.4.4 วิเคราะห์ผลของตัวเลื่อนเฟสที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง

จากผลของการคำนวนโหลดโฟลว์ทั้ง 3 กรณีข้างต้น พบว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสที่สายส่งระหว่างบัส 2 และบัส 5 จะมีผลทำให้การไหลของกำลังจริงในสายส่งต่างๆเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม ขณะที่การไหลของกำลังรีแอคทีฟก็มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกันแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดน้อยเมื่อเทียบกับขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริง สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆในระบบได้ดังตาราง ที่ 3.1

มุม ϕ (deg.)	กำลังจริงในสายส่ง 2-5 (MW)	Δ P สายส่ง 2-5 (MW)	θ บัส 5	Δ V บัส 2,5	system loss (MW)
0.0	52.63	—	-5.83	—	7.2182
+1.5	57.70	+5.07	-4.84	small	7.6251
-1.5	47.55	-5.08	-6.82	small	6.9022

ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงในระบบเนื่องจากตัวเลื่อนเฟสที่สายส่ง 2-5

ในสายส่งที่มีตัวเลื่อนเฟสติดตั้งอยู่นั้นการเปลี่ยนแปลงของขนาดการไหลของกำลังจริงจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งในระบบที่ทำการทดสอบนี้ก็คือสายส่งที่ต่อระหว่างบัส 2 และบัส 5 ซึ่งในภาวะปรกติ (base case) มีขนาดการไหลของกำลังจริงเป็น 52.63 MW จะเพิ่มขึ้นเป็น 57.70 MW เมื่อตัวเลื่อนเฟสที่ติดตั้งในสายส่งนั้นมีมุมเป็น +1.5 องศา และจะลดลงเป็น 47.55 MW เมื่อตัวเลื่อนเฟสมีมุมเป็น -1.5 องศา ทำให้เราสังเกตุเห็นว่าขณะที่ตัวเลื่อนเฟสมีมุมเป็นลบจะมีผลทำให้กำลังจริงที่ไหลในสายส่งนั้นมีค่าลดลง และในทางกลับกันถ้าตัวเลื่อนเฟสมีมุมเป็นบวกจะมีผลทำให้กำลังจริงที่ไหลในสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยขนาดของการเพิ่มหรือลดของกำลังจริงที่ไหลในสายส่งนั้นก็ขึ้นกับขนาดและเครื่องหมายของมุมของตัวเลื่อนเฟสเช่น ถ้ามุมมีขนาดเป็นลบมากก็จะทำให้กำลังจริงที่ไหลในสายส่งมีขนาดลดลงมากเช่นกัน และในทางกลับกันถ้ามุมมีขนาดเป็นบวกมากกำลังจริงก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน นอกจากนี้ในขณะที่มุมของตัวเลื่อนเฟสมีค่าเป็นบวกนั้นก็จะส่งผลให้ขนาดของมุมของแรงดันบัสทางปลายของสายส่งคือที่บัส 5 มีขนาดลดลงด้วยคือลดจาก -5.83 องศามาเป็น -4.84 องศา และก็เป็นไปในทางกลับกันเมื่อมุมของตัวเลื่อนเฟสมีค่าเป็นลบจะทำให้ขนาดของมุมของแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตุที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งที่เราได้จากผลของโหลดโฟลว์ทั้ง 3 กรณีก็คือ เราพบว่าขนาดของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการติดตั้งตัวเลื่อนเฟสเข้าไปในระบบ โดยเมื่อมุมของตัวเลื่อนเฟสมีค่าเป็น -1.5 จะทำให้กำลังสูญเสียของระบบลดลงจาก 7.2182 MW มาเป็น 6.9022 MW และจะเพิ่มขึ้นเป็น 7.6251 MW เมื่อมุมของตัวเลื่อนเฟสเป็น +1.5 องศา ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่ตัวเลื่อนเฟสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังจริงในสายส่งต่างๆ ซึ่งเมื่อขนาดการไหลของกำลังจริงในสายส่งต่างๆเปลี่ยนแปลงไปก็ทำให้กำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆเปลี่ยนแปลงไปด้วยและส่งผลให้กำลังสูญเสียรวมของระบบที่คิดจากผลรวมของกำลังสูญเสียในทุกสายส่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทั้งนี้ก็เพราะขนาดกำลังสูญเสียในสายส่งต่างๆขึ้นอยู่กับขนาดการไหลของกำลังจริงในสายส่งนั้นๆนั่นเอง ดังนั้นในเมื่อเราสามารถควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่งได้ เราก็น่าจะสามารถควบคุมการไหลของกำลังจริงเพื่อจุดประสงค์ให้ระบบมีกำลังสูญเสียน้อยลงได้โดยผ่านทางตัวเลื่อนเฟส ถ้าเราสามารถหามุม ϕ ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การไหลของกำลังจริงที่เหมาะสมแล้วก็น่าจะสามารถทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าลดเหลือน้อยที่สุดได้ ซึ่งวิธีในการหามุม ϕ ที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังสูญเสียมีค่าลดลงจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 4

3.5 ประโยชน์และข้อดีข้อเสียของตัวเลื่อนเฟส [6,11]

ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่าหน้าที่หลักของตัวเลื่อนเฟสคือ การควบคุมการไหลของกำลังจริงในสายส่ง ซึ่งการที่สามารถควบคุมการไหลของกำลังจริงได้นั้นทำให้มีประโยชน์ต่างๆดังนี้

1. ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power Transfer Capabilities) ระหว่างพื้นที่กับพื้นที่ หรือระหว่างระบบไฟฟ้าที่อยู่ข้างเคียงกัน

2. ช่วยชลอความต้องการในการขยายตัวของระบบในอนาคต

3. ทำให้ทั้งสามารถป้องกันและแก้ไขภาวะ over load ของสายส่งต่างๆในระบบได้

นอกจากนี้ข้อดีที่สำคัญอีกอย่างของตัวเลื่อนเฟสก็คือ มันสามารถควบคุมกำลังจริงได้โดยไม่มีผลกระทบต่อภาวะการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic Dispatch Generation Condition) รวมทั้งสามารถควบคุมกำลังจริงได้โดยไม่ต้องใช้การจัดกำลังการผลิตใหม่(Generation Rescheduling) ส่วนข้อจำกัดของตัวเลื่อนเฟสก็คือ มันไม่สามารถควบคุมให้มีการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงไปเป็นค่ามากๆได้โดยตัวเองเพียงลำพัง ทั้งนี้เนื่องมาจากมีขนาดจำกัดของมุมและภาวะของระบบเข้ามาเกี่ยวข้องรวมทั้งตัวมันเองก็เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูง ดังนั้นเมื่อต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงในขนาดมากๆแล้วจึงไม่อาจใช้ตัวเลื่อนเฟสเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้หลักการอื่นเช่น การจัดกำลังการผลิตใหม่ หรือการตัดโหลดออก (Load Curtailment) ฯลฯเข้ามาช่วยด้วย