หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับชันต์คะแปซิเตอร์แบบผสม

5.1 บทนำ

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเพิ่มขึ้นของราคาพลังงานไฟฟ้า และมีการขยายตัวเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้น ด้วยเหตุนี้เองทำให้เกิดการต้องพัฒนาวิธีการใหม่ ๆ สำหรับแก้ปัญหาในเรื่องของการออกแบบ การดำเนินการ และการควบคุมการใช้งานของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด ในปัจจุบันนี้การเติบโตในสาขาไมโครอิเล็คโทรนิก ดิจิตอลอิเล็คโทรนิก และการสื่อสารได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นหนทางที่จะเปิดไปสู่เทคนิคในการควบคุมวิธีใหม่ ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาระบบจำหน่าย (Distribution System) อีกทั้งการควบคุม การดำเนินงาน และความสลับซับซ้อนของเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อเร็ว ๆ นี้เองก็ได้ถูกย่อส่วนลงมาเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็ก ๆ ซึ่งมีราคาถูกซึ่งเรียกว่า Single Chip ทำให้สื่อในการส่งผ่านข้อมูลได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยที่มีราคาต่ำเมื่อเทียบกับฟังก์ชันที่สามารถทำงานได้ และด้วยวิวัฒนาการนี้เองเป็นผลให้โรงไฟฟ้าสามารถที่จะแก้ไขปัญหาสำหรับสำหรับเรื่องการเพิ่มขึ้นของราคา และการเพิ่มขีดความสามารถของการผลิตได้

ในระดับของระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะมีความต้องการแนวความคิดที่ก้าวหน้าเพื่อที่จะพัฒนาเทคโนโลยีที่เพิ่งจะกำเนิดขึ้นมา ในวิทยานิพนธ์บทนี้เรามีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาแบบแผนเบื้องต้นของชันต์คะแปซิเตอร์แบบสวิตชิง (Switching Capacitor) เพื่อที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟบนสายป้อนของระบบจำหน่ายแบบปฐมภูมิ โดยใช้คอมพิวเตอร์แบบที่มีการเชื่อมโยง (On-Line) กับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย วัตถุประสงค์ของการควบคุมเพื่อที่จะทำให้ค่าความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นบนสายป้อนแบบเรเดียลมีค่าน้อยที่สุด โดยการใช้ชันต์คะแปซิเตอร์แบบที่มีการสวิตชิงกับระบบในหลายระดับ (Multilevel Switching) เวลาในการต่อเข้า/ปลดออก (Switching On/Off) ประจำวันจะเกี่ยวข้องกับระดับของรีแอกตีฟโหลดที่เกิดขึ้นในเวลานั้นจริง ๆ (Real Time) และดังนั้นทำให้เราสามารถวางแผน

การติดตั้งคะแปซิเตอร์บนสายป้อน เมื่อทราบข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายของโหลดแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นข้อดีข้อหนึ่งสำหรับวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถจะนำไปปฏิบัติได้อย่างจริง ๆ กับระบบที่มีอยู่ หรือโดยการใช้ข้อมูลเดิมของสายป้อนแล้วนำเอาวิธีการคำนวนอันนี้ไปใช้เป็นแบบแผนก็ได้ สำหรับกระบวนการออกแบบเพื่อที่จะหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ที่จะถูกควบคุม

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ปัญหา 2 ชนิดด้วยกันเพื่อที่จะควบคุมให้ความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นบนสายป้อนแบบเรเดียลของระบบจำหน่ายมีค่าน้อยที่สุด สำหรับปัญหาประการแรกก็คือปัญหาการควบคุม ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแบบแผนของการสวิตชิ่งที่เกิดขึ้นในเวลาจริง (Real-Time) สำหรับชันต์คะแปซิเตอร์ซึ่งได้ถูกหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งบนสายป้อนเรียบร้อยแล้วในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา สำหรับปัญหาประการหลังก็คือปัญหาการออกแบบ ซึ่งจะเกี่ยวข้องวิธีการออกแบบของแบบแผนการควบคุมแบบใหม่ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับชันต์คะแปซิเตอร์ทั้งระบบค่าคงที่ (Fixed) และ/หรือ คะแปซิเตอร์แบบสวิทช์ (Switched) สำหรับสายป้อนที่เรารู้ค่าของ Reactive Load Duration Curve

สำหรับปัญหาการควบคุม เราจะพิจารณาว่าค่าโหลดแบบรีแอกตีฟมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาจริง (Real Time) บนสายป้อนในลักษณะเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าโหลดบนสายป้อนสามารถที่จะประมาณได้โดยใช้ค่านี้ที่วัดออกมาได้ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเพียงอย่างเดียว ในที่นี้เราต้องการที่จะหาเวลาในการต่อเข้า/ปลดออกของคะแปซิเตอร์แบบสวิตช์ เพื่อที่จะทำให้การลดลงของค่าความสูญเสียของพลังงานมีค่ามากที่สุด ซึ่งในปัญหานี้ตำแหน่งและค่าพิกัดต่าง ๆ ของคะแปซิเตอร์ทั้งแบบค่าคงที่และแบบสวิตช์จะต้องถูกกำหนดให้ก่อนหน้านี้แล้ว และน่าจะสังเกตุว่าไม่ใช่คะแปซิเตอร์แบบสวิตช์ทั้งหมดจะมีการทำงานพร้อมกัน นั่นหมายความว่าเวลาในการสวิตช์ของคะแปซิเตอร์แต่ละตัวอาจจะไม่เท่ากันได้

สำหรับปัญหาการออกแบบ เมื่อทราบค่าของ Reactive Load Duration Curve สำหรับสายป้อนแบบปฐมภูมิ สิ่งที่ต้องการที่จะหาก็ขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของคะแปซิเตอร์จำนวน n ตัว ซึ่งเป็นแบบค่าคงที่ และ/หรือ แบบสวิตช์ เพื่อที่จะทำให้ความประหยัดจากกำลังค่ายอด (Peak Power) และการลดลงของพลังงานมีค่ามากที่สุด และสำหรับปัญหานี้ก็เหมือนกันกับปัญหาแรก กล่าวคือเวลาในการบริการ (In Service Time) ของคะแปซิเตอร์แต่ละตัวไม่จำเป็นจะต้องมีค่าเท่ากัน

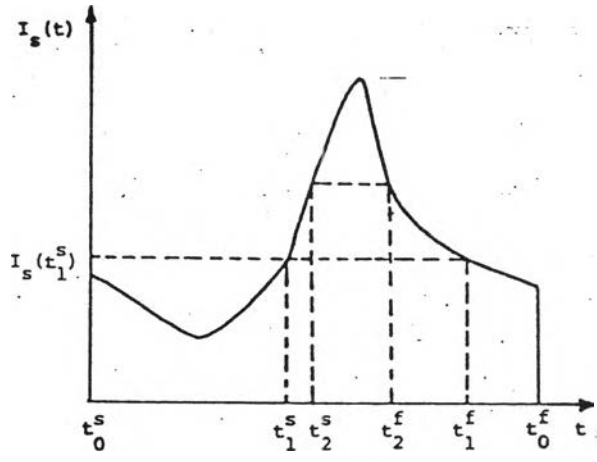
5.2 แนวความคิดเกี่ยวกับกลยุทธ์ในการควบคุมแบบหลายระดับ

ในกรณีแรกจะเป็นการพิจารณาถึงปัญหาการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายป้อนที่มีอยู่ ซึ่งลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ได้ถูกกำหนดให้แล้ว นั่นหมายถึงว่าขนาดสาย พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ความยาวของสายแต่ละส่วน และการกระจายของโหลดเป็นกิโลวาร์บนสายป้อนได้ถูกกำหนดให้แล้ว นอกจากนี้ยังรู้ค่าแหน่งและค่าพิกัดเป็นกิโลวาร์ของชันต์คะแปซิเตอร์ทั้งแบบค่าคงที่และแบบสวิตช์อีกด้วย ซึ่งคะแปซิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำมาติดตั้งบนสายป้อนที่กำหนดให้ เนื่องจากว่าวัตถุประสงค์ของการควบคุมคือการลดค่าความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นบนสายป้อนโดยใช้การชดเชยของกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ มันเป็นที่คาดกันได้ว่าระดับของรีแอกตีฟโหลดบนสายป้อนจะเป็นตัวตัดสินว่าคะแปซิเตอร์แต่ละตัวจะ ต่อเข้า/ปลดออก จากระบบหรือไม่ จะกำหนดให้กระแสโหลดแบบรีแอกตีฟซึ่งจะถูกป้อนให้กับสายป้อนในเวลา t ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยแทนด้วยสัญลักษณ์ $I_s(t)$ ภายใต้การวัดค่าของ $I_s(t)$ ทำให้สามารถที่จะตัดสินใจได้ว่าคะแปซิเตอร์แบบสวิทช์ตัวใดจะถูกต่อเข้ากับระบบ ดังนั้นเราจะใช้กลยุทธ์ในการควบคุมการสวิทช์ของคะแปซิเตอร์แบบหลายระดับดังต่อไปนี้

1) คะแปซิเตอร์แต่ละตัวบนสายป้อนจะถูกพิจารณาว่าเป็นชนิดใดชนิดหนึ่งดังต่อไปนี้คือ ชนิด 0, ชนิด 1, ชนิด 2,... เป็นต้น

2) คะแปซิเตอร์ชนิด 0 จะถูกกำหนดให้เป็นคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ ซึ่งจะต่อเข้ากับระบบตลอดเวลา โดยไม่พิจารณาถึงระดับของรีแอกตีฟโหลด

3) ขณะที่รีแอกตีฟโหลด $I_s(t)$ เพิ่มขึ้น คะแปซิเตอร์ชนิด j จะถูกต่อเข้ากับระบบก่อนชนิด (j+1), (j+2),... แต่ขณะที่โหลด $I_s(t)$ ลดลง คะแปซิเตอร์ชนิด j จะถูกปลดออกจากระบบก่อนชนิด (j-1), (j-2),...,1



รูปที่ 5-1 Daily Reactive Load Profile กับเวลาในการสับเข้า/ปลดออกจากระบบ

ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5-1 จะเป็นรูปของ Daily Reactive Load Profile ซึ่งจะแสดงให้เห็นเวลาในการ ต่อเข้า/ปลดออก ของคะแปซิเตอร์ 3 ชนิด คือ ชนิด 0, ชนิด 1, ชนิด 2 โดยที่ t^s_j คือเวลาที่คะแปซิเตอร์ชนิด j จะถูกต่อเข้ากับระบบ และ t^f_j คือเวลาที่คะแปซิเตอร์ชนิด j ถูกปลดออกจากระบบ มันจะเห็นได้อย่างชัดเจนอยู่แล้วว่า t^s_0 และ t^f_0 ของคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ไม่ได้แสดงให้เห็นความหมายในทางปฏิบัติแต่อย่างไร ในรูปที่ 5-1 ขนาดของกระแสโหลดแบบรีแอกตีฟที่ t^s_j และ t^f_j จะเท่ากัน นั่นคือ

$$I_s(t^s_j) = I_s(t^f_j) \qquad (j=1,2,\ldots,n) \qquad (5.1)$$

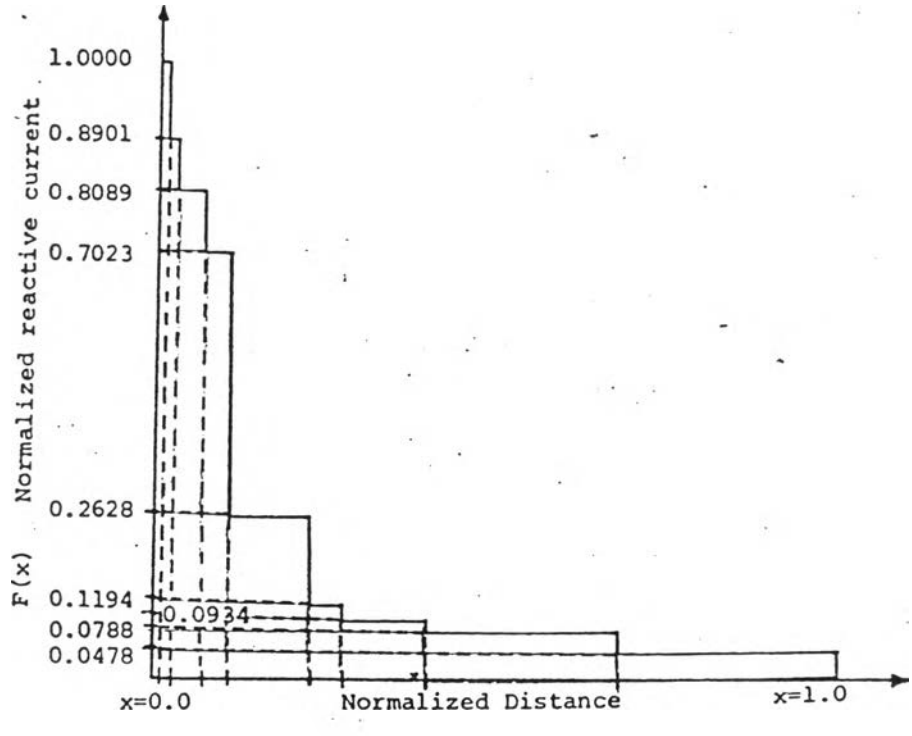
ในความเป็นจริงสำหรับเซ็ตของคะแปซิเตอร์แบบสวิทช์ชนิด j ค่าของ $I_s(t^s_j)$ เท่ากับ $I_s(t^f_j)$ จะเป็นค่าที่ถูกคำนวนขึ้นมาดังจะแสดงให้เห็นในตอนหลัง ดังนั้นในขณะที่กำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟวัดที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีค่าถึง $I_s(t^s_j)$ คะแปซิเตอร์ชนิด j ทุกตัวจะถูกต่อเข้าหรือปลดออกจากระบบ ซึ่งจะขึ้นกับว่าโหลดในขณะนั้นจะกำลังเพิ่มขึ้นหรือลดลง

5.3 แบบจำลองของกระแสโหลดแบบรีแอกตีฟและกระแสคะแปซิเตอร์

เพื่อที่จะหาระดับของโหลดสำหรับเซ็คต่าง ๆ ของคะแปซิเตอร์ที่จะถูกต่อเข้าหรือปลดออกจากระบบ ก่อนอื่นเราจะใช้ F(x) แทนฟังก์ชันการกระจายของรีแอกตีฟโหลดบนสายป้อน เหมือนกับที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้วว่า สำหรับสายป้อนที่กำหนดให้ขนาด 23 kV ประกอบด้วยส่วนย่อย ๆ 9 ส่วนด้วยกัน และมีสายขนาดต่าง ๆ กัน 5 ขนาด ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ของสายป้อนเส้นนี้ได้ถูกแสดงเอาไว้แล้วในบทที่ 3 ข้างต้น ถ้ากำหนดให้ x แทนระยะทางที่วัดจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยของสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Feeder ทำให้สามารถหาฟังก์ชัน F(x) หรือที่เรียกว่า ฟังก์ชัน Normalized Reactive Current ได้จาก

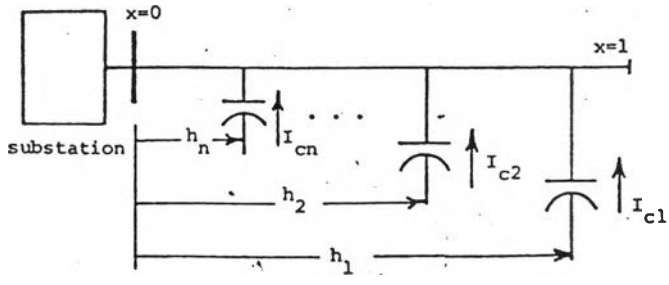
$$F(x) = \sum_{x \le \alpha \le 1} \frac{I(\alpha)}{I_p} \qquad (5.2)$$

โดยที่ I_p คือค่ายอดของกระแสรีแอกตีฟ (Peak Reactive Current) ที่จะถูกฉีดเข้าไปในสายป้อนที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย และ $I(\alpha)$ จะแทนฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสรีแอกตีฟ (Reactive Current Density) ที่ระยะ α บนสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Feeder สำหรับกรณีสายป้อนที่มีหลาย ๆ ส่วนนี้ ถ้ากระแสโหลดเป็นแบบที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ (Continuous Distributed) จะใช้เครื่องหมายอินทริเกรดแทนเครื่องหมายซิกมาในสมการ (5.2) ในรูปที่ 5-2 จะแสดงให้เห็นถึง Normalized Reactive Current Function, F(x) สำหรับสายป้อนที่กำหนดให้โดยใช้ค่าฐาน (Base) คือ 4186 kVar ซึ่งก็คือผลรวมของค่าโหลดแบบรีแอกตีฟ



รูปที่ 5-2 ฟังก์ชัน Normalized Reactive Current, F(X)

ค่าตำแหน่งติดตั้งและพิกัดเป็นกิโลวาร์ของคะแปซิเตอร์จะถูกแทนด้วยแบบจำลองในรูปที่ 5-3 สำหรับคะแปซิเตอร์ n ตัว ซึ่งอาจจะเป็นแบบค่าคงที่ และ/หรือ แบบสวิทช์ จะถูกให้ตัวเลขเรียงจากน้อยไปหามาก จากปลายของสายป้อนไปจนถึงสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ตำแหน่งของสายป้อนจะถูกวัดจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยไปตามสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Feeder และจะถูกแทนด้วย h_i (i=1,2,...,n) ค่าพิกัดเป็นกิโลวาร์ต่อหน่วย (Per Unit) ของคะแปซิเตอร์ตัวที่ i จะถูกแทนด้วย I_{ci} และยังอาจจะใช้ค่าผันแทนกระแสรีแอกตีฟของคะแปซิเตอร์ตัวที่ i ได้อีกด้วย



รูปที่ 5-3 ตำแหน่งติดตั้งและกระแสของคะแปซิเตอร์แต่ละตัว

5.4 การควบคุมคะแปซิเตอร์แบบหลายระดับในเวลาจริง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า คะแปซิเตอร์ทั้ง n ตัวนี้จะถูกจัดแบ่งชนิดออกไป ซึ่งในแต่ละชนิดก็จะมีเซ็ตของคะแปซิเตอร์จำนวนหนึ่งที่อยู่ในชนิดนั้น ๆ โดยที่คะแปซิเตอร์แต่ละตัวจะต้องถูกจัดให้อยู่ในชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นมันเป็นที่เข้าใจกันว่าในขณะที่โหลดเป็นค่ายอด คะแปซิเตอร์ทุกตัวจะต้องถูกต่อเข้ากับระบบ ถ้าเรากำหนดให้

A(j) = เซ็ตของคะแปซิเตอร์ทั้งหมดที่อยู่ในชนิด j

AB(j) = {A(0), A(1),...,A(j)}

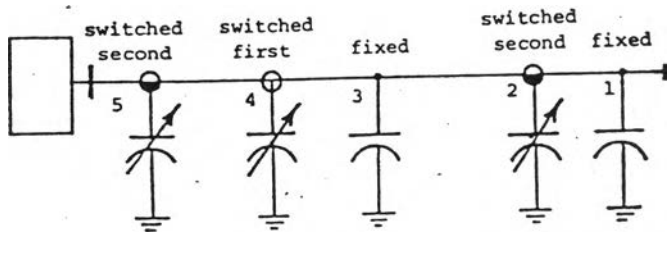
ซึ่งจะมีความหมายอย่างง่าย ๆ ว่า AB(j) เป็นการรวมของเซ็ตของคะแปซิเตอร์ทั้งหมดที่อยู่ในชนิด 0,1,...,j เพื่อที่จะลดค่าของพลังงานสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นได้ให้มากที่สุด คะแปซิเตอร์ชนิด j ทุกตัวจะต้องถูกต่อเข้ากับระบบเมื่อไหร่ก็ตามที่กระแสรีแอกตีฟซึ่งถูกวัดที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับซึ่งกำหนดโดย

$$I_s(t^{-}_{j}) = \sum_{i\in A(j)} \{h_i I_{ci} (I_{c1}/2 + \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck})\} + \sum_{i\in Ab(j-1)} \{h_i I_{ci} (\sum_{k=1}^{i-1} I_{ck})\}$$

$$k\in AB(j) \qquad\qquad k\in A(j)$$

$$\sum_{i\in A(j)} \{I_{ci} \int_{0}^{h_i} F(x)dx\} \qquad (5.3)$$

ในทำนองเดียวกันคะแปซิเตอร์ชนิด j ควรจะถูกปลดออกจากระบบเมื่อกระแสรีแอกตีฟลดลงถึงระดับที่กำหนดให้ในสมการ (5.3) ในที่นี้อาจจะลองพิจารณาถึงคะแปซิเตอร์ 5 ตัวด้วยกัน ซึ่งทั้งขนาดและตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์บนสายป้อนถูกกำหนดให้ดังแสดงในรูปที่ 5-4 คะแปซิเตอร์ตัวที่1และ3 เป็นคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นคะแปซิเตอร์ตัวที่ 4 จะเป็นตัวที่ถูกต่อเข้าไปในระบบเป็นตัวแรก และคะแปซิเตอร์ตัวที่ 2 และ 4 จะเป็นคะแปซิเตอร์ที่จะถูกต่อเข้ากับระบบพร้อมกันในการต่อเข้ากับระบบครั้งที่ 2 เราต้องการเขียนสมการซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า ระดับของกระแสรีแอกตีฟขนาดเท่าใดที่จะทำให้คะแปซิเตอร์ทั้งสองเซ็ตถูก ต่อเข้า/ปลดออก จากระบบ



รูปที่ 5-4 ลำดับการต่อเข้า/ปลดออกของคะแปซิเตอร์ทั้ง 5 ตัว

โดยใช้สัญลักษณ์ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ แน่นอนว่าคะแปซิเตอร์ตัวที่ 1 และ 3 เป็นคะแปซิเตอร์ชนิด 0 สำหรับคะแปซิเตอร์ตัวที่ 4 เป็นคะแปซิเตอร์ชนิด 1 และสำหรับคะแปซิเตอร์ตัวที่ 2 และ 5 เป็นคะแปซิเตอร์ชนิด 2 ตามลำดับ ดังนั้น

$A(0) = \{1,3\}$

$A(1) = \{4\}$; $AB(1) = \{1,3,4\}$

$A(2) = \{2,5\}$; $AB(2) = \{1,3,4,2,5\}$

โดยการใช้สมการ (4.3) ดังนั้นคะแปซิเตอร์ตัวที่ 4 จะต้องต่อเข้ากับระบบเมื่อรีแอกตีฟโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับ

$$I_s(t^c_1) = h_4 I_{c4}(I_{c4}/2 + I_{c1} + I_{c3}) \qquad (5.4)$$

$$\frac{}{I_{c4}\int_0^{h_4} F(x)dx}$$

ซึ่งคะแปซิเตอร์ตัวที่ 2 และตัวที่ 5 จะถูกต่อเข้ากับระบบเมื่อระดับของโหลดเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่กำหนดโดย

$$I_s(t^c_2) = h_2 I_{c2}(I_{c2}/2+I_{c1}) + h_5 I_{c5}(I_{c5}/2+\sum_{k=1}^{4} I_{ck}) + I_{c2}\sum_{k=3}^{4} h_i I_{ci}$$

$$\frac{}{I_{c2}\int_0^{h_2} F(x)dx + I_{c5}\int_0^{h_5} F(x)dx}$$

(5.5)

ควรจะจำไว้อย่างหนึ่งว่า สมการ (5.3) ไม่ได้ขึ้นกับรูปร่างของ Daily Reactive Load Profile ถึงแม้เวลาในการ ต่อเข้า/ปลดออก ของคะแปซิเตอร์ได้ถูกแสดงให้เห็นบนรูปของ Load Profile ในรูปที่ 5-1 ก็ตาม แต่ก็เป็นเพียงการแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างเท่านั้น สมการที่ (5.3) จะแสดงถึงระดับของโหลดแบบรีแอกตีฟสำหรับคะแปซิเตอร์ซึ่งมีการต่อเข้า/ปลดออกจำนวนหนึ่ง โดยที่ค่านี้จะขึ้นขนาดและตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ที่ถูกกำหนดให้เท่านั้น ตามที่แสดงไว้ดังสมการ (5.3) จะทำให้สามารถหาระดับของโหลดที่เซ็ตของคะแปซิเตอร์จะถูกต่อเข้า/ปลดออก มันเป็นลักษณะที่สำคัญสำหรับการนำไปปฏิบัติของการควบคุมการสวิตช์แบบหลายระดับของคะแปซิเตอร์ เราสามารถจะสร้างฟังก์ชันการกระจายของกระแสรีแอกตีฟ F(x) ขึ้นมาได้หลายฟังก์ชันเพื่อที่จะแทนการกระจายของโหลดแบบรีแอกตีฟตลอดทั้งวัน โดยที่โหลดที่เกิดขึ้นแต่ละจุดนั้นไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงพร้อมกัน (Non Conforming) ดังนั้นสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ในตอนแรกเกี่ยวกับโหลดที่ว่าโหลดจะต้องเป็นแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงในเวลาเดียวกันนั้นก็จะไม่มีความจำเป็น ฟังก์ชัน F(x) ที่เหมาะสมสามารถถูกเลือกโดยใช้สมการ (5.3) จะขึ้นกับเวลาในแต่ละวัน (หรือแต่ละฤดู) ในลักษณะนี้เราจะมีตารางซึ่งจะสร้างขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงชนิดต่าง ๆ กันในแต่ละวัน ยิ่งกว่านั้นโดยการใช้การศึกษาแบบหยุดการใช้งาน (Off-Line) จะทำให้เราสามารถคำนวนข้อมูลต่าง ๆ ของสายป้อนที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในลักษณะต่าง ๆ ของสายป้อนเนื่องจากการจัดเรียงสายป้อนใหม่ หรือ การแบ่งส่วนย่อยใหม่ (Sectionalizing) ดังนั้นวิธีการที่ได้แสดงในที่นี้สามารถใช้ได้กับสถานะการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง โดยใช้ข้อมูลที่ได้มาจะทำให้เราทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะที่ควรจะเป็นของสายป้อน

ถึงตอนนี้จะพิจารณาตัวอย่าง ซึ่งเป็นแบบตัวเลขสำหรับข้อมูลของสายป้อนดังแสดงไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น กล่าวคือถ้าสมมุติให้ว่ามีคะแปซิเตอร์ 3 ตัว ซึ่งมีค่าพิกัด 1200 kVar, 600 kVar, และ 300 kVar ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ที่ 4.02 ไมล์, 6.32 ไมล์, และ 16.27 ไมล์ ตามลำดับ ในขณะที่โหลดเพิ่มขึ้น คะแปซิเตอร์แบบสวิทช์ทั้งสามตัวจะต้องมีการต่อเข้ากับระบบในลำดับดังนี้คือ 1200 kVar, 300 kVar, และ 600 kVar เราต้องการที่จะหาระดับของกระแสรีแอกตีฟของโหลดที่จะทำให้คะแปซิเตอร์ทั้งสามตัวจะต่อเข้า/ปลดออกจากระบบ

สำหรับวิธีการในการแก้ปัญหานี้ก็คือ เมื่อกำหนดให้คะแปซิเตอร์มีพิกัด 1200

kVar, 600 kVar, และ 300 kVar ซึ่งจะต้องกำหนดชนิดของคะแปซิเตอร์แต่ละตัว กล่าวคือ ชนิดที่ 1, ชนิด 3, และชนิด 2 ตามลำดับ นั้นคือ

A(1) = (3)

A(2) = (1) ; AB(2) = (3,1)

A(3) = (2) ; AB(3) = (3,1,2)

จากตารางข้อมูลที่กำหนดให้ในบทที่ 3 นั้น ทำให้สามารถที่จะหาตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์บนสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Feeder ได้จาก

h_1 = 1.0000 (บัสที่ 1)

h_2 = 0.2248 (บัสที่ 5)

h_3 = 0.1074 (บัสที่ 6)

และมีค่ากระแสพิกัดเป็น

I_{c1} = 300 kVar = 0.0717 pu.

I_{c2} = 600 kVar = 0.1433 pu.

I_{c3} = 1200 kVar = 0.2867 pu.

โดยแทนค่าต่าง ๆ ที่กำหนดให้ลงในสมการ (5.3) ทำให้สามารถทราบได้ว่า

$I_s(t^{\leftarrow}_1) = I_s(t^{\rightarrow}_1)$ = 0.1811 pu. = 758 kVar

$I_s(t^{\leftarrow}_2) = I_s(t^{\rightarrow}_2)$ = 0.3894 pu. = 1630 kVar

$I_s(t^{\leftarrow}_3) = I_s(t^{\rightarrow}_3)$ = 0.5437 pu. = 2276 kVar

ดังนั้นคะแปซิเตอร์ที่มีค่าพิกัด 1200 kVar, 600 kVar, และ 300 kVar จะถูก ต่อเข้า/ปลดออก จากระบบเมื่อโหลดแบบรีแอกตีฟวัดที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีค่าเป็น 758 kVar, 2276 kVar, และ 1630 kVar ตามลำดับ

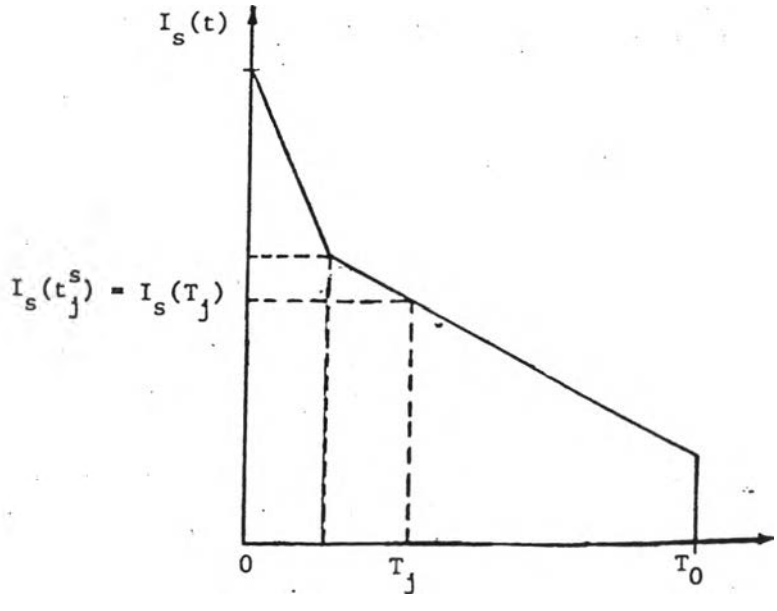
ข้อสังเกต ถ้าเราคิดว่ามีคะแปซิเตอร์ 2 ตัวอยู่ในระบบ คือ ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นจากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นมันจะต้องเป็นกรณีที่ว่า $I_s(t^-_1) \leq I_s(t^-_2)$ แต่ถ้าจากผลของการคำนวนที่ได้ตามสมการ (5.3) มีค่าออกมาว่า $I_s(t^-_1) > I_s(t^-_2)$ ดังนั้นในกรณีนี้จะตีความหมายว่า คะแปซิเตอร์ตัวที่ 1 ควรจะเป็นชนิดที่ 2 และคะแปซิเตอร์ตัวที่ 2 ควรจะเป็นชนิดที่ 1 ตามลำดับ (ไม่ควรจะเป็นชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ดังได้กล่าวมาในตอนต้น) เพื่อที่จะทำให้เกิดการลดลงของการสูญเสียพลังงานให้มากที่สุดสำหรับคะแปซิเตอร์ที่ทั้งขนาดและตำแหน่งติดตั้งถูกกำหนดให้ (เหตุการณ์เช่นนี้ ($I_s(t^-_1) > I_s(t^-_2)$) อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ขนาด และ/หรือ ตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ถูกกำหนดให้อย่างไม่เหมาะสม

สำหรับปัญหาอีกประการหนึ่งซึ่งเป็นปัญหาที่ค่อนข้างจะยาก แต่ไม่ได้หมายความว่าจะไม่มีทางที่จะแก้ไขได้ นั่นก็คือการกำหนดชนิดของคะแปซิเตอร์แต่ละตัวโดยปราศจากการวิเคราะห์ในรายละเอียด ในความเป็นจริงแล้วการแบ่งแยกชนิดของคะแปซิเตอร์จะถูกส่งผลกระทบโดยตัวแปรหลายตัว ตัวอย่างเช่น ขนาดของสายป้อนแต่ละส่วน ตำแหน่งของจุดโหลด การกระจายของโหลดบนสายป้อน ขนาดและตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ เป็นต้น ดังนั้นมันจะปรากฏว่าจะต้องมีการตรวจสอบอย่างละเอียดในหลาย ๆ กรณี ประกอบกับการตัดสินใจของวิศวกรซึ่งอาจจะเป็นวิถีทางหนึ่งซึ่งจะแก้ปัญหาอันนี้ให้ลุล่วงไปได้

5.5 *ปัญหาการออกแบบ*

ในตอนก่อนหน้านี้ได้พิจารณาถึงการนำไปใช้งานของระบบการควบคุมการสวิตชิงแบบหลายระดับ ในกรณีนี้ขนาดและตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์จะถูกกำหนดให้ และเราจะเป็นผู้หาผลที่เกิดขึ้นจากการลดลงของพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากเวลาในการสวิตชิง (Switching Time) ของคะแปซิเตอร์แบบสวิตช์ มันเป็นสิ่งที่น่าสนใจโดยวิศวกรในระบบจำหน่ายอย่างเห็นได้ชัดว่า จะต้องมีการออกแบบโครงการชดเชยโดยใช้คะแปซิเตอร์เป็นอย่างแรก สำหรับสายป้อนที่กำหนดให้ เราจะให้วิธีการออกแบบของเราขึ้นกับข้อมูลทางสถิติโดยการใช้ข้อมูลในอดีตสำหรับโหลดแบบรีแอกตีฟที่กระจายบนสายป้อน สำหรับขั้นตอนการวางแผนที่จะสร้างสายป้อนใหม่นั้น ข้อมูลของรีแอกตีฟโหลดที่สามารถจะทำนาย (Forecast) ได้จากข้อมูลที่มีอยู่ที่คิดว่าเหมาะสมที่สุด ในการที่จะแสดงวิธีการออกแบบคะแปซิเตอร์ในที่นี้เราจะ

สมมติว่า ข้อมูลต่าง ๆ มีอย่างเพียงพอเกี่ยวข้องกับโหลดบนสายป้อนเพื่อที่จะทำให้เราสามารถสร้างรูปแบบของ Reactive Load Duration Curve ได้ดังแสดงในรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-5 Reactive Load Duration Curve

สำหรับระดับของโหลดที่คะแปซิเตอร์ชนิด j จะถูกต่อเข้ากับระบบสามารถคำนวนได้โดยใช้สมการ (5.3) ค่าของ $I_s(t_j)$ สามารถใช้ในลักษณะซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5-5 เพื่อที่จะหาช่วงเวลาในการบริการ (In Service Duration) ของคะแปซิเตอร์ j ปัญหาการออกแบบก็เพื่อที่จะหาคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ และ/หรือ แบบสวิตช์ เพื่อที่จะติดตั้งบนสายป้อนสำหรับการควบคุมการทำงานในลักษณะที่กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้ว ผลก็คือมันหมายความว่าเราจะต้องหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 3 ตัว นั่นคือ ขนาด ตำแหน่งติดตั้ง และ เวลาในการบริการของคะแปซิเตอร์แต่ละตัว เพื่อที่จะทำให้เกิดความประหยัดมากที่สุดที่เกิดจากการลดลงของกำลังค่ายอด (Peak Power) และพลังงานสูญเสียในขณะที่เราจะต้องคิดราคาของคะแปซิเตอร์แต่ละตัวที่เราจะนำมาติดตั้งในที่นี้ด้วย

เพื่อที่จะสร้างสมการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการออกแบบ ในที่นี้เราจะพิจารณาถึงการติดตั้งคะแปซิเตอร์ n ตัว ซึ่งจะมีชนิด 0, 1,..., m และดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า คะแปซิเตอร์ชนิด 0 จะถูกกำหนดให้เป็นแบบค่าคงที่ และแน่นอนที่สุดว่า $n \geq m+1$ ถ้ากำหนดให้

LP = ค่าของกำลังค่ายอดที่ลดลงเนื่องจากการติดตั้งคะแปซิเตอร์

LE = ความสูญเสียพลังงานที่ลดลงเนื่องจากการติดตั้งคะแปซิเตอร์

ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่เราต้องการจะหาค่าที่ประหยัดมากที่สุดจะสามารถเขียนออกมาได้เป็น

$$S = K_p LP + K_e LE - K_{cf} \sum_{\substack{i=0 \\ i\in A(0)}}^{n} I_{ci} - K_{cs} \sum_{\substack{i=1 \\ i\in\{A(1),\ldots,A(m)\}}}^{n} I_{ci} \qquad (5.6)$$

โดยที่

K_p = ราคาต่อปีต่อหน่วยของกำลังสูญ (Annual Cost Per Unit of Power Loss) ในหน่วย $/kW/yr

K_e = ราคาต่อหน่วยของพลังงานที่ผลิต (Per Unit Energy Production) ในหน่วย $/kWh

K_{cf} (K_{cs}) = ราคาต่อปีต่อหน่วยของการติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบคงที่ (สวิตช์) (Annual Cost Per Unit of Instralled Fixed (Switched) Capacitor) ในหน่วย $/kVar 3 phase

$$\text{และ} \quad LP = \sum_{i=1}^{n} LP_i \qquad (5.7)$$

$$LE = \sum_{i=1}^{n} LE_i \qquad (5.8)$$

LP_i (LE_i) = การลดลงของกำลัง(พลังงาน)สูญเสียที่เกิดขึ้นจากคะแปซิเตอร์ตัวที่ i เพิ่มขึ้นมาจากตัวที่ 1,2,...,(i-1)

สำหรับคะแปซิเตอร์แต่ละตัว (i=1,2,...,n) ค่า LP_i และ LE_i อาจจะถูกกำหนดได้จาก

$$LP_i = 2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_s F(x) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck})dx - rh_i I_{ci}^2 \qquad (5.9)$$

$$LE_i = \sum_{j=a_i}^{m-1} \int_{t^c_{j+1}}^{t^c_j} [2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{k=1,\, k\in AB(j)} I_{ck})dx - rh_iI_{ci}^2]dt$$

$$+ \int_{t^c_m}^{t^c_m} [2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{k=1,\, k\in AB(m)} I_{ck})dx - rh_iI_{ci}^2]dt$$

$$+ \sum_{j=a_i}^{m-1} \int_{t^c_{j+1}}^{t^c_j} [2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{k=1,\, k\in AB(j)} I_{ck})dx - rh_iI_{ci}^2]dt \quad (5.10)$$

โดยที่ $I_s(t)$ แทนค่ารีแอกตีฟโหลดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งอาจจะแทนด้วย Daily Load Profile ดังแสดงในรูปที่ 5-1 จะเห็นได้ว่าเฉพาะขนาดของรีแอกตีฟโหลดและช่วงเวลาเท่านั้นที่จะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียพลังงาน ผลที่ตามมาก็คือ $I_s(t)$ ที่ใช้แทน Load Duration Curve ในรูปที่ 5-5 นั้น สามารถเทียบได้กับที่ใช้สมการที่ (5.10) ดังนั้นเมื่อใช้ T_j แทนค่าของ t^c_j และ t^c_j ทำให้สามารถเขียนค่าของ LE_i ได้จากสมการ

$$LE_i = \sum_{j=a_i}^{m-1} \int_{T_{j+1}}^{T_j} [2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{k=1,\, k\in AB(j)} I_{ck})dx - rh_iI_{ci}^2]dt$$

$$+ \int_0^{T_m} [2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{k=1,\, k\in AB(m)} I_{ck})dx - rh_iI_{ci}^2]dt \quad (5.11)$$

และ $I_{\ell}(t)$ จะแทนด้วย Load Duration Curve ในรูปที่ 5-5 ดังนั้นในกระบวนการต่อไปค่า LE_i จะใช้จากสมการที่ (5.11) เท่านั้น

5.6 *วิธีการหาคำตอบโดยการแยกการคำนวนลงเป็นส่วน ๆ*

มันเป็นงานที่ยากมากถ้าจะหาคำตอบของตัวแปร 3 ตัวแปรในขณะเดียวกัน ในที่นี้ก็คือ ขนาด ตำแหน่งติดตั้ง และช่วงเวลาในการบริการ ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (5.6) ซึ่งก็คือค่าความประหยัดที่จะเกิดขึ้นในระบบมีค่ามากที่สุด ผลที่ตามมาก็คือปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนี้จะถูกแยกออกไป (Decomposed) เป็นโปรแกรมย่อย 3 โปรแกรมด้วยกัน ซึ่งในโปรแกรมย่อยแต่ละโปรแกรมตัวแปรสองในสามจะถูกกำหนดให้ และจะใช้คอมพิวเตอร์ในการหาคำตอบของกระบวนการทำซ้ำ (Iterative Procedure) ซึ่งจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 5-6 ซึ่งเราจะใช้สัญญลักษณ์ต่าง ๆ ดังนี้

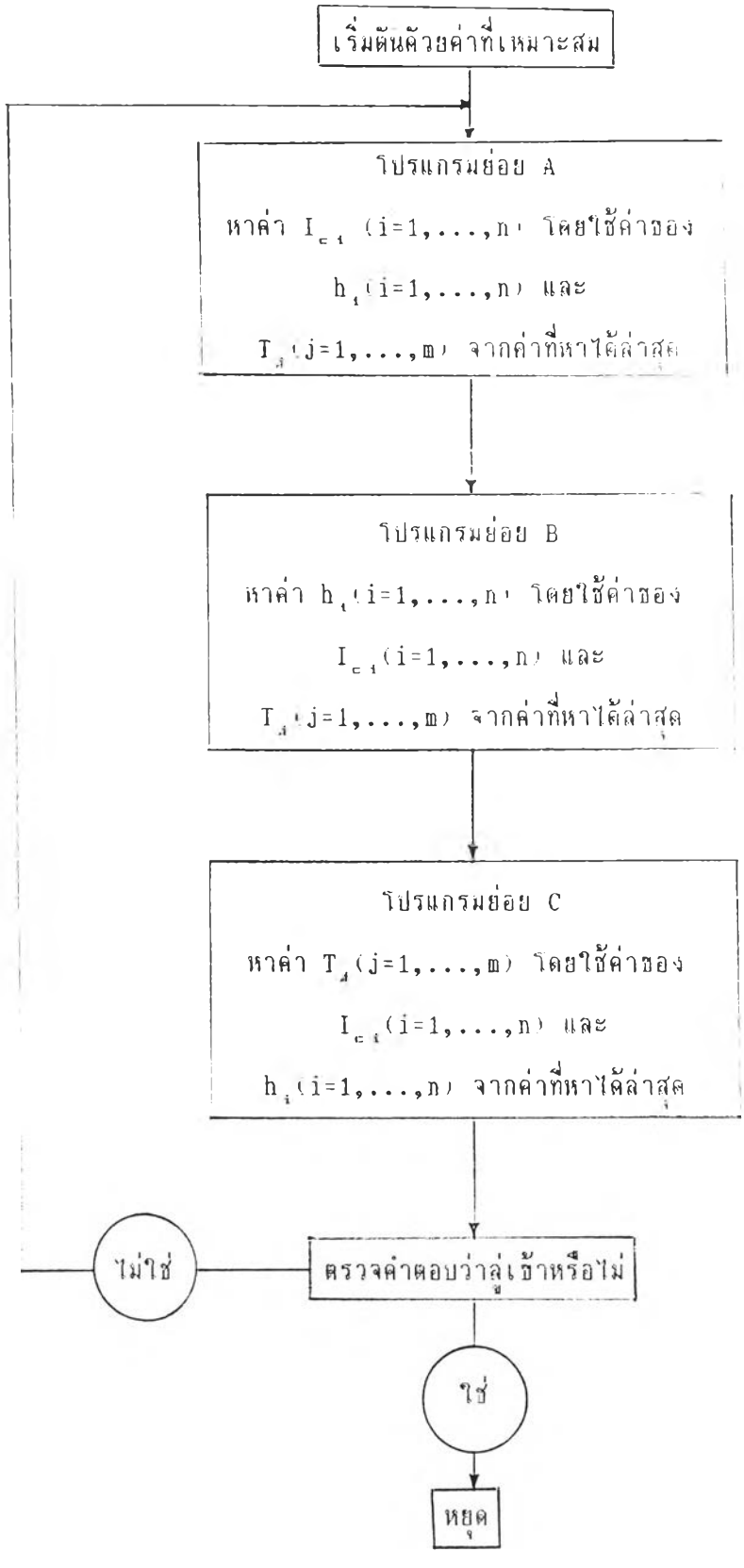
ให้ a_i แทนคะแปซิเตอร์ชนิด i เหมือนกับที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าคะแปซิเตอร์แต่ละชนิดของคะแปซิเตอร์จำนวน n ตัวได้ถูกกำหนดให้ และ $a_i (i=1,\ldots,n)$ จะถูกกำหนดให้ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าคะแปซิเตอร์ตัวที่ i เป็นคะแปซิเตอร์ชนิด j ดังนั้น $a_i = j$ และกำหนดให้สัญญลักษณ์

t_j	เขียนแทนด้วย	t_{a_i}
T_j	เขียนแทนด้วย	T_{a_i}
$A(j)$	เขียนแทนด้วย	$A(a_i)$

โดยการใช้ Load Duration Curve ของรูปที่ 5-5 และจะกำหนดให้ Load Factor ซึ่งจะขึ้นกับค่า T_j เป็น

$$L_{cs} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \frac{I_c(t)}{I_s} dt \qquad (5.12)$$

จะสังเกตุว่า T_o ซึ่งคือค่าของช่วงเวลาในการบริการสำหรับคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่จะมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 5-6 กรรมวิธีหาคำตอบแบบทำซ้ำโดยการแยกการคำนวนออกเป็นส่วน ๆ

โปรแกรมย่อย A: การหาขนาดของคะแปซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

ถ้าตำแหน่ง $h_i (i=1,\ldots,n)$ และช่วงเวลาในการบริการ $T_j (j=1,\ldots,m)$ เป็นค่าที่เราทราบ ขนาดของคะแปซิเตอร์สามารถหาได้จากเซ็ตของสมการเชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$[H][I_c] = [B] \qquad (5.13)$$

โดยที่ $[I_c] = [I_{c1}, I_{c2},\ldots, I_{cn}]^t$ เป็นเวคเตอร์ที่เราต้องการหามีขนาด n มิติ สำหรับ [H] เมตริกจะมีขนาด n*n มิติ และสำหรับ [B] เมตริกจะมีขนาด n*1 มิติ โดยที่เมตริกทั้งสองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_{ij} = \begin{cases} h_i(K_p+K_eT_{ai}) & \text{ถ้า } j\le i \text{ และ } a_j\le a_i \\ h_i(K_p+K_eT_{aj}) & \text{ถ้า } j<i \text{ และ } a_j>a_i \\ h_j(K_p+K_eT_{ai}) & \text{ถ้า } j>i \text{ และ } a_j\le a_i \\ h_j(K_p+K_eT_{aj}) & \text{ถ้า } j>i \text{ และ } a_j>a_i \end{cases} \qquad (5.14)$$

$$B_i = \begin{cases} (K_p+K_eT_{ai}L_{fai}) \int_0^{h_i} I_sF(x)dx - K_{cc}/2r & \text{ถ้า } a_i=0 \\ (K_p+K_eT_{ai}L_{fai}) \int_0^{h_i} I_sF(x)dx - K_{cs}/2r & \text{ถ้า } a_i=1,\ldots,m \end{cases} \qquad (5.15)$$

พิสูจน์ เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหาขนาดของคะแปซิเตอร์สำหรับทุก ๆ $i=1,\ldots,n$

$$dS/dI_{ci} = K_p dLP/dI_{ci} + K_e dLE/dI_{ci} = K_{ci} = 0 \quad (5.16)$$

โดยที่

$$K_{ci} = \begin{cases} K_{cf} & \text{ถ้า } a_i = 0 \\ K_{cs} & \text{ถ้า } a_i = 1,\ldots,n \end{cases}$$

โดยใช้สมการ (5.9) และ (5.11) เราจะได้ว่า

$$dLP_i/dI_{ci} = 2r \int_0^{h_i} I_s F(x)dx - 2rh_i \sum_{k=1}^{i} I_{ck} \quad (5.17)$$

$$dLP_k/dI_{ci} = -2rh_k I_{ck} \quad \text{สำหรับ } k>i \quad (5.18)$$

$$dLP_k/dI_{ci} = 0 \quad \text{สำหรับ } k<i \quad (5.19)$$

$$dLE_i/dI_{ci} = T_{ai} 2rL_{fai} \int_0^{h_i} I_s F(x)dx - 2rh_i \sum_{j=a_i}^{m} \left(T_j \sum_{\substack{k=1 \\ k\in AB(j)}} I_{ck}\right) \quad (5.20)$$

$$dLE_k/dI_{ci} = -2rh_k I_{ck} T_{ai} \quad \text{สำหรับ } k>i \text{ และ } a_k<a_i \quad (5.21)$$

$$dLE_k/dI_{ci} = -2rh_kI_{ck}T_{ak} \quad \text{สำหรับ } k>i \text{ และ } a_k>a_i \qquad (5.22)$$

$$dLE_k/dI_{ci} = 0 \quad \text{สำหรับ } k<i \qquad (5.23)$$

แทนค่าสมการ (5.17)-(5.23) ลงในสมการ (5.16) และจัดเรียงสมการใหม่ จะทำให้เราสามารถหาสมการเชิงเส้น (5.16) ได้ โดยที่เมตริก [H] และ [B] หาได้จากสมการ (5.14) และ (5.15) ตามลำดับ

ไปรแกรมย่อย B: การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคะแปซิเตอร์

ถ้าคะแปซิเตอร์ขนาด $I_{ci}(i=1,\ldots,n)$ และช่วงเวลาในการบริการ T_j $(j=1,\ldots,m)$ ถูกกำหนดให้ ทำให้สามารถหาตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ h_i $(i=1,\ldots,n)$ บนสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Feeder ได้โดยการอ่านออกมาจากฟังก์ชันการกระจายของรีแอกตีฟโหลด F(x) ดังรูปที่ 5-2 กล่าวคือ สำหรับ i=1,...,n

$$F(h_i) = \frac{K_p(I_{ci}/2 + \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}) + K_e(T_{ai}I_{ci}/2 + \sum_{k=1}^{i-1} D_{ik}I_{ck})}{I_s(K_p + K_eT_{ai}L_{fai})} \qquad (5.24)$$

โดยที่ $$D_{ik} = \begin{cases} T_i & \text{ถ้า } a_i \geq a_k \\ T_k & \text{ถ้า } a_i < a_k \end{cases} \qquad (5.25)$$

<u>พิสูจน์</u> ก่อนอื่นควรจะสังเกตุเห็นว่าค่าของ LP_i และ LE_i จะขึ้นกับ h_i เท่านั้น ไม่ใช่ $h_j(j\neq i)$ ดังนั้นสำหรับแต่ละค่าของ i โดยที่ i=1,...,n เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมก็คือ

$$dS/dh_i = K_p dLP_i/dh_i + K_e dLE_i/dh_i = 0 \qquad (5.26)$$

จากสมการ (5.9) และ (5.11) จะได้ว่า

$$dLP_i/dh_i = 2rI_{ci}(I_g F(h_i) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}) - rI_{ci}^2 \qquad (5.27)$$

$$dLE_i/dh_i = T_{ai}(2rI_{ci}I_g L_{fai} F'(h_i) - rI_{ci}^2)$$

$$- 2rI_{ci}[T_{ai} \sum_{k \in AB(a_i)}^{i-1} I_{ck} + \sum_{j=a_i+1}^{m} (T_j \sum_{k \in A(j)}^{i-1} I_{ck})] \qquad (5.28)$$

แทนค่าสมการ (5.27) และ (5.28) ลงในสมการ (5.26) จะทำให้ได้ว่าเงื่อนไขที่จำเป็นในการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของคะแปซิเตอร์ได้ดังสมการ (5.24) และ (5.25) ตามต้องการ

โปรแกรมย่อย C: การหาช่วงเวลาในการบริการที่เหมาะสมที่สุด

ถ้าขนาดของคะแปซิเตอร์ I_{ci} และตำแหน่งติดตั้งคะแปซิเตอร์ h_i $(i=1,\ldots,n)$ ถูกกำหนดให้ ทำให้สามารถหาค่าช่วงเวลาในการบริการ $T_j (j=1,\ldots,m)$ ได้ตาม Load Duration Curve ในรูปที่ 5-5 โดยที่ สำหรับ $j=1,\ldots,m$

$$I_g(T_j) = \sum_{i \in A(j)} \{h_i I_{ci}(I_{ci}/2 + \sum_{k=1,\, k \in AB(j)}^{i-1} I_{ck}) + \sum_{i \in AB(j-1)} (h_i I_{ci} \sum_{k=1,\, k \in A(j)}^{i-1} I_{ck})\}$$

$$\sum_{i \in A(j)} \{I_{ci} \int_0^{h_i} F(x)\,dx\} \qquad (5.29)$$

พิสูจน์ เนื่องจากการลดลงของกำลังสูญเสีย LP เป็นอิสระจากการสวิตชิง เราต้องการที่จะจัดการกับการลดลงของพลังงานสูญเสีย LE เท่านั้น ดังนั้นช่วงเวลาในการบริการควรจะสอดคล้องกับสมการสำหรับเงื่อนไขที่จำเป็นดังนี้

$$dLE/dT_j = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } j=1,\ldots,m \qquad (5.30)$$

เมื่อทำการดิฟเฟอร์เรนชิเอตสมการ (5.29) เทียบกับ T_j เราจะได้

$$dLE_i/dT_j = -2rI_{ci} \int_0^{h_i} (I_g(T_j)F(x) - \sum_{k=1,\, k \in AB(j)}^{i-1} I_{ck})\,dx + rh_i I_{ci}^2$$

ถ้า $j=a_i$ (5.31)

$$dLE_i/dT_j = 2rh_i I_{ci} \sum_{k=1,\, k \in AB(j)}^{i-1} I_{ck}$$

ถ้า $j>a_i$ (5.32)

$$dLE_i/dT_j = 0$$

ถ้า $j<a_i$ (5.33)

เมื่อนำสมการ (5.31)-(5.33) แทนลงในสมการ (5.30) และจัดเรียงเสียใหม่จะได้สมการที่ (5.29) ตามต้องการ เนื่องจากฟังก์ชันของความประหยัดหรือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) S เป็นฟังก์ชันแบบคอนเคฟซ์ (Concave Function) สำหรับค่าของ $I_{c,i}$, b_i และ T_i ตามลำดับ ดังนั้นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการแก้ปัญหาในที่นี้ จะเป็นเงื่อนไขที่จะเพียงพอสำหรับโปรแกรมย่อยในแต่ละโปรแกรมตามลำดับ

เป็นที่น่าสังเกตุอีกอย่างหนึ่งด้วยว่า สำหรับเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับเวลาในการสวิตชิ่งที่เหมาะสมที่สุดสามารถหาได้จาก

$$dLE/dt^{c}_{j} = 0 \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } j=1,\ldots,m \qquad (5.34)$$

โดยที่ LE_i ตอนนี้จะแสดงได้โดยสมการ (5.10) ไม่ใช่สมการ (5.11) แล้ว แต่อย่างไรก็ตามผลจากการหาค่าคำตอบจะได้เหมือนกันกับสมการ (5.31)-(5.33) ซึ่งในที่นี้เฉพาะ T_i จะถูกแทนด้วย t^{c}_{i} ดังนั้นสมการ (5.10) สามารถจะหาได้ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับโปรแกรมย่อย C เหมือนกัน มันจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่เหมือนกันจะได้จากการดิฟเฟอร์เรนชิเอต LE เทียบกับ t^{c}_{i} แทนที่จะเป็น t^{f}_{i} แต่ยิ่งไปกว่านั้น

$$dLE/dt^{c}_{i} = - dLE/dt^{f}_{i} \qquad (5.35)$$

ซึ่งสมการ (5.35) นี้จะเห็นได้ในรูป 5-1 อยู่แล้ว ดังนั้นจึงเป็นการดีที่จะบันทึกเอาไว้ว่า สมการ (5.3) และสมการ (5.29) เหมือนกันทุกประการ

5.7 *การหาค่าคะแปซิเตอร์ในทางปฏิบัติ*

เหมือนกับที่ได้เคยกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งอาจจะกล่าวได้อีกครั้งหนึ่งว่า ขนาดของคะแปซิเตอร์ที่หามาได้จากกระบวนการหาค่าคอบในหัวข้อที่ 5.6 นั้น อาจจะไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด นั่นคือเป็นคะแปซิเตอร์ที่ขนาดไม่ได้มาตรฐาน ดังนั้นเราจึง

ต้องมีการปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบของเราให้เหมาะสมกับปัญหาเรื่องนี้ เพื่อที่จะทำให้คะแปซิเตอร์ที่จะติดตั้งเป็นคะแปซิเตอร์ที่มีขนาดได้มาตรฐานนั้นเราจะทำได้โดย หลังจากที่เราได้หาค่าขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับคะแปซิเตอร์เรียบร้อยแล้วจากกระบวนการทำซ้ำในหัวข้อ 5.6 ให้ทำการดัดแปลงขนาดของคะแปซิเตอร์ที่ได้ออกมานั้นให้มีขนาดเท่ากับมาตรฐานโดยให้มีขนาดใกล้เคียงกันกับค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Value) หลังจากนั้นก็นำค่านี้กลับไปคำนวนหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งวิธีการนั้นจะเหมือนรูปที่ 5-6 ทุกประการยกเว้นให้ตัดการคำนวนในโปรแกรมย่อย A ทิ้งไป เนื่องจากในที่นี้เราทราบขนาดของคะแปซิเตอร์ที่ได้มาตรฐานอยู่แล้ว ซึ่งคำตอบที่ได้ออกมานั้นจะเป็นคำตอบของตำแหน่งติดตั้งและเวลาในการบริการของคะแปซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคะแปซิเตอร์ที่ใช้กันตามมาตรฐานทั่วไป

5.7 *ตัวอย่างการคำนวน*

ในตัวอย่างต่อไปนี้จะใช้ข้อมูลดังนี้คือ K_p = $120/kW/yr; K_e = 15 mills/kWh; K_{cf} = $3.50/3 phase kVar; K_{cs} = $6.0/3 phase kVar; T_o = 1 pu = 8760 hr. และกำหนดให้มีค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับคะแปซิเตอร์โดยคิดเป็น 14.3% ของราคาของคะแปซิเตอร์แต่ละตัวต่อปี สำหรับข้อมูลที่ใช้ในที่นี้จะเป็นเพียงข้อมูลที่ใช้เพื่อเพียงที่จะแสดงเป็นตัวอย่างเท่านั้น สำหรับผู้ใช้จะสามารถที่จะใช้ข้อมูลของตนเองเพื่อที่จะใช้ได้กับระบบที่กำลังปฏิบัติงานอยู่ ในที่นี้เราต้องการที่จะติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ 1 ตัว และคะแปซิเตอร์แบบสวิตช์ 2 ตัวบนสายป้อนที่กำหนดให้เส้นหนึ่ง ซึ่งเราจะใช้ข้อมูลของสายป้อนอันเดียวกับที่ใช้ในบทที่ 3 โดยที่คะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่จะอยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยที่สุด พิจารณาว่าภายใต้เงื่อนไขของการทำงานของการเพิ่มขึ้นของค่ารีแอกตีฟโหลด คะแปซิเตอร์แบบสวิตช์จะถูกติดตั้งอยู่ห่างไกลจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยที่สุด จะเป็นตัวที่จะต่อเข้ากับระบบเป็นตัวแรก เราจะใช้ Load Duration Curve ในรูปที่ 5-5 เป็นตัวแทนของรีแอกตีฟโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ภายใต้ช่วงเวลาที่ถูกสนใจ ในที่นี้เราต้องการที่จะหาค่าขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของคะแปซิเตอร์แต่ละตัว ซึ่งจะทำให้ความประหยัดมากที่สุดที่เกิดจากกำลังค่ายอด และ พลังงานสูญเสียที่ลดลง และจะต้องการประมาณว่าช่วงเวลาในการบริการของคะแปซิเตอร์แบบสวิตช์แต่ละตัวมีค่าเป็นเท่าใด

จากตัวปัญหาที่กำหนดให้ คะแปซิเตอร์ I_{c1}, I_{c2}, และ I_{c3} เป็นคะแปซิเตอร์ชนิด 1, 2, และ 0 ตามลำดับ ดังนั้น $a_1 = 1$, $a_2 = 2$, $a_3 = 0$ และ

A(0) = {3}

A(1) = {1}; AB(1) = {3,1}

A(2) = {2}; AB(2) = {3,1,2}

โดยการใช้กรรมวิธีของกระบวนการทำซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5-6 จะหาค่าของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 5 เพื่อความง่ายเราจะแสดงคำตอบของโปรแกรมย่อยทั้งสองในครั้งสุดท้าย นั่นคือในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 5 โดยที่ตอนปลายของกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 4 ขนาด ตำแหน่งติดตั้ง และ เวลาในการบริการของคะแปซิเตอร์แต่ละตัวจะมีค่าดังต่อไปนี้คือ

$$I_{c1} = 0.0623 \text{ pu}$$
$$I_{c2} = 0.1638 \text{ pu} \qquad (5.36)$$
$$I_{c3} = 0.3643 \text{ pu}$$

$$h_1 = 1.0000 \text{ pu} = 16.27 \text{ mile}$$
$$h_2 = 0.2248 \text{ pu} = 6.32 \text{ mile} \qquad (5.37)$$
$$h_3 = 0.1074 \text{ pu} = 4.02 \text{ mile}$$

$$T_0 = 1.0000 \text{ pu} = 8760 \text{ hr}$$
$$T_1 = 0.5787 \text{ pu} = 5069 \text{ hr} \qquad (5.38)$$
$$T_2 = 0.1914 \text{ pu} = 1677 \text{ hr}$$

โปรแกรมย่อย A: โดยการใช้ Load Duration Curve ของรูปที่ 5-5 ทำให้สามารถหาค่า Reactive Load Factor Duration ได้จากสมการ (5.12) โดยที่

$L_{c0} = 0.4800$

$L_{c1} = 0.6072$

$L_{c2} = 0.8086$

เมื่อตำแหน่งและช่วงเวลาถูกกำหนดให้ในสมการ (5.37) และ (5.38) หลังจากแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (5.14) และ (5.15) จะได้

$$[H] = \begin{bmatrix} 196.046 & 32.629 & 21.055 \\ 32.692 & 32.629 & 15.589 \\ 21.055 & 15.589 & 27.000 \end{bmatrix} \qquad (5.39)$$

$$[B] = [25.230 \quad 13.057 \quad 13.701] \qquad (5.40)$$

แก้สมการ (5.13) เราจะได้คำตอบคือ

$I_{c1} = 0.0623$ pu

$I_{c2} = 0.1638$ pu (5.41)

$I_{c3} = 0.3643$ pu

โปรแกรมย่อย B: สำหรับค่าที่เพิ่งจะหาได้สำหรับขนาดของคะแปซิเตอร์ (5.41) และช่วงเวลาในการบริการ (5.38) จะใช้ค่านี้และข้อมูลเกี่ยวข้องกับราคาต่าง ๆ แทนลงไปในสมการ (5.24) และ (5.25) จะได้

$F(h_1) = 0.0368$

$F(h_2) = 0.1492$ (5.42)

$F(h_3) = 0.6173$

ทำให้สามารถหาค่าแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของคะแปซิเตอร์ได้ โดยการอ่านค่าจาก F(x) ของรูปที่ 5-2 ซึ่งจะได้ว่า

$$h_1 = 1.0000 \text{ pu} = 16.27 \text{ mile}$$
$$h_2 = 0.2248 \text{ pu} = 6.32 \text{ mile} \qquad (5.43)$$
$$h_3 = 0.1074 \text{ pu} = 4.02 \text{ mile}$$

โปรแกรมย่อย C: ในโปรแกรมย่อยนี้ค่าของขนาดคะแปซิเตอร์ (5.41) และตำแหน่งติดตั้ง (5.43) ของคะแปซิเตอร์ซึ่งเพิ่งจะหามาได้ จะถูกนำลงมาแทนลงในสมการ (5.29) ซึ่งทำให้สามารถหาค่า $I_s(T_i)$ ได้โดย

$$I_s(T_1) = 0.4106 \text{ pu}$$
$$I_s(T_2) = 0.6173 \text{ pu} \qquad (5.44)$$

และค่าช่วงเวลาในการบริการสามารถหาได้โดยการอ่านจาก Load Duration Curve ในรูปที่ 5-5 โดยที่

$$T_1 = 0.5787 \text{ pu} = 5069 \text{ hr}$$
$$T_2 = 0.1914 \text{ pu} = 1677 \text{ hr} \qquad (5.45)$$
$$T_3 = 1.0000 \text{ pu} = 8760 \text{ hr}$$

เมื่อเทียบกันแล้วจะเห็นได้ว่าขนาดของคะแปซิเตอร์ (5.36) ตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ (5.37) และช่วงเวลาในการบริการ (5.38) สำหรับกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 4 กับค่าที่หาได้จากกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 5 นั้นคือสมการ (5.41), (5.42), (5.43) มีค่าเหมือนกันตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการทำซ้ำในที่นี้จะสิ้นสุด ซึ่งผลของการหาคำตอบอาจจะสรุปได้ดังนี้คือ สำหรับคะแปซิเตอร์ที่ทำการออกแบบจะมีขนาดค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$I_{c1} = 0.0623 \text{ pu}$$
$$I_{c2} = 0.1638 \text{ pu}$$
$$I_{c3} = 0.3643 \text{ pu}$$

ติดตั้งอยู่ที่

h_1 = 1.0000 pu = 16.27 mile

h_2 = 0.2248 pu = 6.32 mile

h_3 = 0.1074 pu = 4.02 mile

และจะมีค่าช่วงเวลาในการบริการของคะแปซิเตอร์ที่มีพิกัด 0.0632 pu และ 0.1638 pu เป็น 5069 hr และ 1677 hr ตามลำดับ สำหรับคะแปซิเตอร์ที่มีพิกัด 0.3643 pu จะเป็นคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่

ตารางที่ 5.1

ผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำเมื่อ $K_c = 0$

ตัวที่	ชนิด	บัส	KVar	ระดับทำงาน (KVar)	ช่วงเวลาบริการ Per Unit	Objective Function
1	1	1	267.56	1794.42	0.540805	
2	2	5	1083.39	3064.47	0.132199	8655
3	0	6	1613.17	0.00	1.000000	
1	1	1	300.00	1889.21	0.498990	
2	2	5	1083.39	3127.38	0.124784	8737
3	0	6	1613.17	0.00	1.000000	
1	1	1	267.56	1794.41	0.540809	
2	2	5	1100.00	3080.57	0.130302	8668
3	0	6	1613.17	0.00	1.000000	
1	1	1	267.56	1848.91	0.516767	
2	2	5	1083.39	3144.93	0.122715	8924
3	0	6	1700.00	0.00	1.000000	
1	1	1	300.00	1943.71	0.474948	
2	2	5	1100.00	3223.95	0.113401	9017
3	0	6	1700.00	0.00	1.000000	

ตารางที่ 5.2

ผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำเมื่อ $K_{c1}=3.5$, $K_{c2}=6$

ตัวที่	ชนิด	บัส	KVar	ระดับกำลังงาน (KVar)	ช่วงเวลาบริการ Per Unit	Objective Function
1	0	1	253.55	0.00	1.000000	
2	1	5	656.00	1127.88	0.834837	4853
3	2	6	1263.04	1946.02	0.473930	
1	0	1	257.69	0.00	1.000000	
2	2	5	797.33	2343.09	0.298770	5761
3	1	6	1154.74	1054.49	0.867212	
1	1	1	238.08	1858.20	0.512667	
2	0	5	884.97	0.00	1.000000	5290
3	2	6	1078.85	2099.32	0.406301	
1	2	1	284.67	2633.60	0.182988	
2	0	5	868.84	0.00	1.000000	6835
3	1	6	1052.19	1761.48	0.555334	
1	2	1	298.07	2588.86	0.190351	
2	1	5	594.36	1959.93	0.467794	7095
3	0	6	1492.97	0.00	1.000000	
1	1	1	261.05	1708.02	0.578919	
2	2	5	652.32	2534.36	0.214391	6887
3	0	6	1505.86	0.00	1.000000	