หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการพื้นฐานของ ATC

ความสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าพร้อมมูล หรือ ATC (Available Transfer Capability) เป็นค่าบ่งบอกถึงความสามารถที่เหลืออยู่ในการส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งระหว่างจุดในระบบไฟฟ้ากำลังอาจหมายถึงกลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกลุ่มของบัสที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้า หรืออาจหมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสที่มีความต้องการไฟฟ้าก็ได้

ATC ใช้ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาในการส่งเสริมการแข่งขันภายในตลาดซื้อขายไฟฟ้า โดยการเปิดให้ผู้ซื้อขายไฟฟ้าสามารถเข้าถึงแหล่งข้อมูลที่มีการปรับปรุงค่า ATC อยู่ตลอดเวลา เพื่อนำข้อมูลค่า ATC ไปใช้ในการตัดสินใจซื้อขายไฟฟ้า ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลช่วยในการควบคุมดูแลระบบไฟฟ้า

2.1 นิยามของ ATC

NERC (North American Electric Reliability Council) [4] ได้กำหนดคำจำกัดความของ ATC ซึ่งใช้กับระบบที่เชื่อมโยงกัน (interconnected system) ดังนี้

ATC (Available Transfer Capability) คือ ปริมาณของความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหลืออยู่ทางกายภาพของระบบส่งไฟฟ้า ในสภาวะของระบบขณะนั้น โดยในทางคณิตศาสตร์ ATC สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$ATC = TTC - TRM - CBM - ETS \tag{2.1}$$

TTC (Total Transfer Capability) คือ ความสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าทั้งหมด โดยไม่ละเมิดขีดจำกัดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งขีดจำกัดต่าง ๆ ของความสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย

1.) <u>ขีดจำกัดด้านความร้อน</u> เป็นขีดจำกัดในการรับกระแสของสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยขีดจำกัดนี้จะป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสายส่ง

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.) ขีดจำกัดด้านแรงดัน ระบบไฟฟ้ากำลังมีการกำหนดช่วงของแรงดันที่ยอมรับได้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบ

3.) ขีดจำกัดด้านเสถียรภาพ ระบบส่งควรจะสามารถรองรับการรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตของระบบ

TRM (Transmission Reliability Margin) คือ ปริมาณโดยรวมของกำลังไฟฟ้าของสายส่งที่จำเป็นในการรับรองว่าสายส่งจะมีความมั่นคงภายใต้ความไม่แน่นอนของสภาวะระบบ

CBM (Capacity Benefit Margin) คือ ปริมาณโดยรวมของกำลังไฟฟ้าที่สำรองไว้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่ต้นทางไปยังพื้นที่ปลายทาง เพื่อให้ระดับความเชื่อถือได้ของกำลังการผลิตในพื้นที่ปลายทางอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ETS (Existing Transmission Commitments) คือ กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านในสายส่งในสภาวะของระบบที่กำลังพิจารณา

2.2 การคำนวณค่า ATC

Ou และ Sigh [1] ได้นำเสนอขั้นตอนการคำนวณ ATC โดยการรวมผลของ TRM และ CBM เข้าไว้ ซึ่งแบ่งการคำนวณออกเป็นกลุ่มคือ การคำนวณ TTC ควบคู่กับ TRM และการคำนวณ CBM

2.2.1 การคำนวณ TTC ควบคู่กับ TRM

หลักสำคัญในการคำนวณ ATC คือการคำนวณ TTC ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการคำนวณค่า TTC ได้เป็น 3 วิธีคือ

1.) Continuation Power Flow (CPF) [5]

2.) Repeated Power Flow (RPF) [1]

3.) Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF)

ทั้งนี้วิธีการ CPF และ RPF เป็นวิธีการที่เป็นที่นิยมในการคำนวณ TTC ซึ่งพื้นฐานของทั้งสองวิธีนี้เหมือนกัน คือการเพิ่มโหลดที่แต่ละบัสของพื้นที่ปลายทางโดยคงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ไว้ และเพิ่มค่ากำลังจริงที่จ่ายเข้าระบบโดยบัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในพื้นที่ต้นทาง จากนั้นตรวจสอบว่า

ละเมิดขีดจำกัดต่าง ๆ ของระบบหรือไม่ ซึ่งถ้าไม่ละเมิดก็เพิ่มโหลดและเพิ่มกำลังการผลิตจนกว่าจะเกิดการละเมิดขีดจำกัดของระบบ

ในทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงการคำนวณ TTC โดยใช้วิธี CPF หรือ RPF ได้ดังนี้

Maximize λ

subject to

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) = 0 \quad (2.2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}) = 0 \quad (2.3)$$

$$|U_i|_{\min} \le |U_i| \le |U_i|_{\max} \quad (2.4)$$

$$S_{ij} \le S_{ij\max} \quad (2.5)$$

เมื่อ

λ คือ ปริมาณสเกลาร์ที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดปลายทางและกำลังการผลิตต้นทาง โดย λ=0 หมายความว่าไม่มีการส่งผ่านพลังงานจากพื้นที่ต้นทางไปยังพื้นที่ปลายทาง ค่าสูงสุดของ λ จะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งผ่านพลังงานสูงสุด

P_{Gi}, Q_{Gi} คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตจากบัส i

P_{Di}, Q_{Di} คือ โหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟที่บัส i

n คือ จำนวนบัสของระบบ

$|U_i|, |U_j|$ คือ ขนาดของแรงดันที่บัส i และ j

G_{ij}, B_{ij} คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพขององค์ประกอบ ij ในเมตริกซ์แอดมิตแตนส์ของระบบ

$|U_i|_{\min}, |U_i|_{\max}$ คือ แรงดันต่ำสุดและสูงสุดของบัสที่ i

S_{ij} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j

$S_{ij\max}$ คือ ขีดจำกัดทางด้านความร้อนของสายส่งระหว่างบัส i กับบัส j

P_{Gi} ที่พื้นที่ต้นทางและ P_{Di} , Q_{Di} ที่พื้นที่ปลายทางจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0(1 + \lambda k_{Gi}) \quad (2.6)$$

$$P_{Di} = P_{Di}^0(1 + \lambda k_{Di}) \quad (2.7)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di}^0(1 + \lambda k_{Di}) \quad (2.8)$$

เมื่อ

P_{Gi}^0 คือ กำลังจริงที่ผลิตเริ่มต้นที่บัส i ในพื้นที่ต้นทาง

P_{Di}^0 Q_{Di}^0 คือ โหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟเริ่มต้นที่บัส i ในพื้นที่ปลายทาง

k_{Gi} k_{Di} คือ ค่าคงที่ที่ระบุถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของการผลิตและโหลดเมื่อค่า λ มีการเปลี่ยนแปลง

ค่า TTC ในแต่ละสภาวะสามารถคำนวณได้โดย

$$TTC = \sum_{i \in Sink} P_{Di}(\lambda_{\max}) - \sum_{i \in Sink} P_{Di}^0 \tag{2.9}$$

เมื่อ

$\sum_{i \in Sink} P_{Di}(\lambda_{\max})$ คือ ผลรวมของโหลดจริงในพื้นที่ปลายทางเมื่อ $\lambda = \lambda_{\max}$

$\sum_{i \in Sink} P_{Di}^0$ คือ ผลรวมของโหลดจริงในพื้นที่ปลายทางเมื่อ $\lambda = 0$

CPF และ RPF เป็นการทำโหลดโฟลว์หลายครั้งโดยการทำโหลดโฟลว์แต่ละครั้งจะมีการเพิ่มค่า λ ข้อแตกต่างระหว่างวิธี CPF และ RPF คือวิธีเพิ่มค่า λ ในวิธี CPF มีการคำนวณหาค่าของ λ ที่เพิ่มขึ้นทุกครั้งที่มีการทำโหลดโฟลว์ซ้ำ ในขณะที่ RPF เป็นวิธีการทำโหลดโฟลว์หลายครั้งโดยเพิ่มของค่า λ ในแต่ละครั้งอย่างคงที่

การคิดผลของ TRM เข้าไปใน TTC สามารถทำได้โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของระดับโหลด โดย Ou และ Singh [1] ได้ใช้การจำลอง Monte Carlo จำลองความไม่แน่นอนของระดับโหลด ขั้นตอนในการคำนวณ TTC ควบคู่กับ TRM มีขั้นตอนดังนี้

1.) เลือกกรณีของระบบที่พิจารณา ซึ่งอาจเป็นกรณีปกติหรือกรณีเกิดเหตุการณ์ผิดพลาด (contingency)
2.) จำลองระดับโหลดโดยการแจกแจงปกติ (normal distribution)
3.) คำนวณโหลดโฟลว์ครั้งแรกโดยกำหนดให้ λ=0 ถ้าผลการคำนวณไม่เกิดการละเมิดขีดจำกัดต่าง ๆ ให้ทำต่อในขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้าเกิดการละเมิดให้ค่า TTC ที่กรณีนี้เป็น 0 และกลับไปในขั้นตอนที่ 2 เพื่อจำลองระดับโหลดใหม่
4.) เพิ่ม λ เป็นจำนวน $\Delta\lambda$
5.) คำนวณโหลดโฟลว์อีกครั้ง

6.) ตรวจสอบผลที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 ถ้าไม่เกิดการละเมิดขีดจำกัดต่าง ๆ ให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้าเกิดการละเมิดขีดจำกัดต่าง ๆ ให้ลดค่า λ เป็นจำนวนร้อยละ 10 ของ $\Delta\lambda$ แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ 5 จนกว่าจะไม่เกิดการละเมิดขีดจำกัดต่าง ๆ แล้วจึงทำต่อในขั้นตอนที่ 7

7.) คำนวณค่า TTC จากค่า λ ที่ได้ ค่า TTC ที่ได้เป็นค่า TTC ของระดับโหลดที่กำลังพิจารณา จากนั้นกลับไปที่ขั้นตอนที่ 2 เพื่อจำลองระดับโหลดใหม่ จนกว่าจะได้จำนวนค่า TTC ครบตามจำนวนระดับโหลดที่จำลองขึ้น จากนั้นจึงทำต่อในขั้นตอนที่ 8

8.) เลือกกรณีในการคำนวณค่า TTC ใหม่ เมื่อได้ค่า TTC ครบทุกกรณีแล้วทำต่อไปในขั้นตอนที่ 9

9.) เปรียบเทียบค่า TTC ที่ได้ในแต่ละกรณีโดยเลือกค่า TTC น้อยที่สุดเป็นค่า TTC ของการส่งกำลังไฟฟ้าของคู่ต้นทางและปลายทางที่กำลังพิจารณาอยู่

จากขั้นตอนข้างต้นการคำนวณค่า TTC โดยไม่รวมผลของ TRM สามารถทำได้โดยละเลยขั้นตอนที่ 2 และหากได้ค่า TTC จากขั้นตอนที่ 3 หรือขั้นตอนที่ 7 แล้ว ให้ทำต่อในขั้นตอนที่ 8

2.2.2 การคำนวณ CBM

การหาค่า CBM ใช้วิธีที่มีพื้นฐานมาจากการประเมินความเชื่อถือได้ของกำลังการผลิตที่พื้นที่ที่พิจารณา เพื่อใช้คำนวณหากำลังการผลิตจากพื้นที่ภายนอกที่พื้นที่ที่พิจารณาอยู่นั้นต้องการ โดยกำลังการผลิตที่ต้องการจากพื้นที่อื่นต้องทำให้ค่า LOLE (Loss of Load Expectation) อยู่ในระดับที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมกำหนดให้ค่า LOLE อยู่ในระดับไม่เกิน 1 วันต่อ 10 ปี

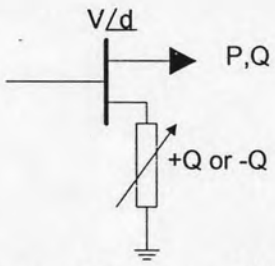
2.3 การคำนวณ ATC โดยคิดผลของอุปกรณ์ FACTS

ในระบบไฟฟ้ากำลังปัจจุบันมีการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS (Flexible AC Transmission System) เข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นผลต่อเนื่องให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบ รวมถึงเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งด้วย

Ou และ Sigh [6] ได้ศึกษาการผลของการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ในการคำนวณค่า ATC โดยได้คำนวณค่า ATC โดยรวมแบบจำลองของอุปกรณ์ FACTS ซึ่งประกอบด้วย SVC และ TCSC เข้าไปในการคำนวณ TTC

2.3.1 การคำนวณ TTC โดยคิดผลของ SVC

SVC (Static Var Compensator) เป็นอุปกรณ์ FACTS ที่ต่อขนานกับระบบ โดย SVC เป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมขนาดของแรงดันบริเวณจุดที่ SVC ติดตั้งอยู่ ซึ่งแบบจำลองสภาวะอยู่ตัว SVC เปรียบเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟ แต่ไม่จ่ายกำลังจริง



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสภาวะอยู่ตัวของ SVC

การติดตั้ง SVC ช่วยควบคุมระดับแรงดันที่จุดติดตั้ง ดังนั้นเมื่อติดตั้ง SVC จึงส่งผลให้เกิดการละเมิดระดับแรงดันในระบบได้ยากขึ้น จึงเป็นผลต่อค่า TTC ที่คำนวณได้ การคำนวณ TTC โดยคิดผลของ SVC สามารถแสดงปัญหาในรูปแบบออปติไมเซชันได้ดังนี้

Maximize λ

subject to

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}(SVC)\cos\delta_{ij} + B_{ij}(SVC)\sin\delta_{ij}) = 0 \qquad (2.10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}(SVC)\sin\delta_{ij} - B_{ij}(SVC)\cos\delta_{ij}) = 0 \qquad (2.11)$$

$$|U_i|_{\min} \le |U_i| \le |U_i|_{\max} \qquad (2.12)$$

$$S_{ij} \le S_{ij\max} \qquad (2.13)$$

$$P_{svc} = 0 \qquad (2.14)$$

เมื่อ

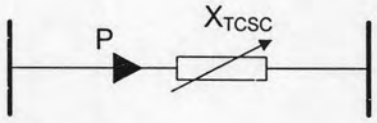
$G_{ij}(SVC), B_{ij}(SVC)$ คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพขององค์ประกอบ ij ในเมตริกซ์แอดมิตแตนส์ของระบบ หลังจากที่ติดตั้ง SVC

P_{svc} คือ กำลังจริงของ SVC

ในการคำนวณ TTC ที่คิดผลของ SVC สามารถทำได้ตามขั้นตอนหัวข้อการคำนวณ TTC ควบคู่กับ TRM โดยให้จุดที่ติดตั้ง SVC เป็นบัสควบคุมแรงดัน (PV bus)

2.3.2 การคำนวณ TTC โดยคิดผลของ TCSC

TCSC (Thyrister Controlled Series Compensator) เป็นอุปกรณ์ FACTS ที่ต่ออนุกรมกับระบบส่ง ใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งเส้นที่ TCSC ติดตั้งอยู่ โดยแบบจำลองสภาวะอยู่ตัวของ TCSC เปรียบเสมือนรีแอกแตนส์ปรับค่าได้



รูปที่ 2.2 แบบจำลองสภาวะอยู่ตัวของ TCSC

การติดตั้ง TCSC เพื่อเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งเส้นที่มีการติดตั้ง ซึ่งจุดประสงค์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งอาจจะแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามการปรับค่ารีแอกแตนส์ของ TCSC จะส่งผลต่อค่า TTC โดยค่า TTC จะแตกต่างกันไปตามค่ารีแอกแตนส์ของ TCSC การคำนวณค่า TTC โดยคิดผลของ TCSC สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

Maximize λ

subject to

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}(X_{TCSC})\cos\delta_{ij} + B_{ij}(X_{TCSC})\sin\delta_{ij}) = 0 \qquad (2.15)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |U_i||U_j|(G_{ij}(X_{TCSC})\sin\delta_{ij} - B_{ij}(X_{TCSC})\cos\delta_{ij}) = 0 \qquad (2.16)$$

$$|U_i|_{\min} \le |U_i| \le |U_i|_{\max} \qquad (2.17)$$

$$S_{ij} \le S_{ij\max} \qquad (2.18)$$

$$X_{TCSC\min} \le X_{TCSC} \le X_{TCSC\max} \qquad (2.19)$$

เมื่อ

$G_{ij}(X_{TCSC}), B_{ij}(X_{TCSC})$ คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพขององค์ประกอบ ij ในเมตริกซ์แอดมิตแตนส์ของระบบ หลังจากที่ติดตั้ง TCSC

X_{TCSC} คือ รีแอกแตนส์ของ TCSC

$X_{TCSC\min}, X_{TCSC\max}$ คือ รีแอกแตนส์ต่ำสุดและสูงสุดของ TCSC

การคำนวณ RPF จะให้ค่า TTC สำหรับ X_{TCSC} ค่าหนึ่ง ดังนั้นในการติดตั้ง TCSC ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่า TTC โดยตรงจึงต้องทำ RPF หลายครั้งเพื่อให้ได้ค่า TTC สำหรับค่า X_{TCSC} แต่ละค่า แล้วจึงนำค่า TTC ที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ค่า TTC ที่มีค่ามากที่สุดจะเป็นค่า TTC ที่คิดผลของ TCSC

2.4 สรุป

จากนิยามของ ATC จะเห็นได้ว่าค่า ATC มีองค์ประกอบหลักคือค่า TTC ถูกหักกำลังส่งด้วยผลของความไม่แน่นอน (TRM), ผลของความเชื่อถือได้ในระบบ (CBM) และกำลังส่งไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในขณะที่พิจารณา ในด้านวิชาการได้มีการนำเสนอวิธีคำนวณ ATC โดยคำนึงถึงผลของปัจจัยต่าง ๆ แตกต่างกันออกไป ซึ่งในการศึกษาอาจมีการละเลยปัจจัยบางปัจจัย นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาผลของการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ที่มีผลต่อค่า ATC และได้มีการนำเสนอวิธีการคำนวณ ATC ที่คิดผลของอุปกรณ์ FACTS อย่างไรก็ตามวิธีการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้เป็นการคำนวณ ATC ที่ใช้วิธีการบนพื้นฐานของการทำโหลดโฟลว์ ซึ่งจะเป็นความเข้าใจพื้นฐานและนำไปสู่การคำนวณ ATC โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ในลำดับต่อไป