

บทที่ 7

การทดสอบคำนวณ ATC ด้วย ANFIS

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบการคำนวณ ATC ด้วย ANFIS กับระบบทดสอบ 30 บัสในโปรแกรม MATPOWER 3.0 [22] โดยออกแบบการทดสอบที่แตกต่างกันออกไปเพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ การทดสอบจะใช้รูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่นำเสนอในบทก่อนหน้า และรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่นำเสนอโดย Vinod Kumar et al. เป็นหลัก จากนั้นจึงทดสอบการคำนวณ ATC ด้วย ANFIS กับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย การทดสอบทั้งหมดมีดังนี้

- 1.) การทดสอบรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกัน เพื่อต้องการดูผลของการเพิ่มขาเข้าของ ANFIS ตามแนวคิดที่นำเสนอ และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ ATC โดยใช้รูปแบบขาเข้าแบบเก่า (Vinod Kumar et al.)
- 2.) การทดสอบรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ในกรณีที่มี TCSC อยู่ในระบบ เพื่อดูผลของการกำหนดค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC เป็นขาเข้า เปรียบเทียบกับกรณีไม่กำหนดรีแอกแตนซ์ของ TCSC เป็นขาเข้า
- 3.) การทดสอบชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันในการคำนวณ ATC เพื่อหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมในการคำนวณ ATC โดยดูความแตกต่างของค่า ATC ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบระหว่าง ANFIS ที่ใช้ชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ขาเข้าของ ANFIS ต่างกัน
- 4.) การทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย จะใช้ข้อมูลระบบส่งทั้งประเทศและข้อมูลโหลดมาสร้างข้อมูล ATC ตัวอย่าง เพื่อนำไปฝึกสอนและตรวจสอบการคำนวณ ATC ด้วย ANFIS เปรียบเทียบผลระหว่างรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอและรูปแบบขาเข้าแบบเก่า

7.1 การทดสอบรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกัน

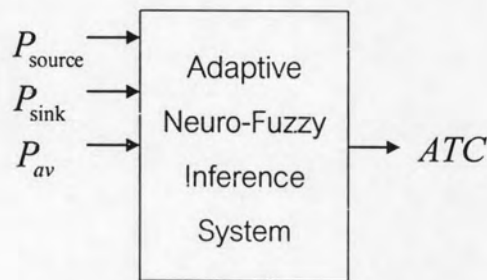
จากข้อสันนิษฐานว่าการกำหนดขาเข้าของ ANFIS ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่า ATC ที่คำนวณได้จาก ANFIS เพื่อตรวจสอบข้อสันนิษฐานนี้ จึงได้ออกแบบการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่า ATC จากการคำนวณด้วย ANFIS ที่มีการกำหนดขาเข้าแตกต่างกัน

7.1.1 รูปแบบขาเข้าในการทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอในบทที่ผ่านมาและรูปแบบขาเข้าแบบเก่าที่ Vinod Kumar et al.นำเสนอ โดยแบ่งรูปแบบขาเข้าที่ใช้ทดสอบ 4 รูปแบบดังนี้

รูปแบบที่ 1

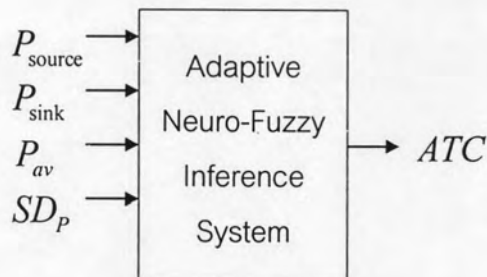
กำหนดขาเข้าคือ กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต้นทาง (P_{source}) กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทาง (P_{sink}) และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ฉีดเข้าบัสอื่น ๆ (P_{av}) กำหนดขาออกคือ ATC ซึ่งแสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.1 ขาเข้าของ ANFIS รูปแบบที่ 1 สำหรับหัวข้อ 7.1

รูปแบบที่ 2

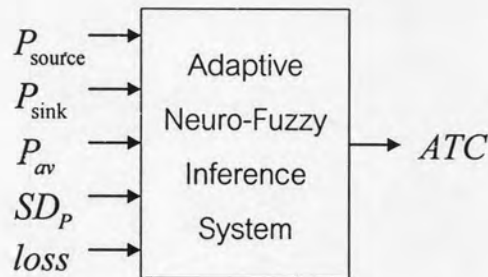
กำหนดขาเข้าคือ กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต้นทาง (P_{source}) กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทาง (P_{sink}) กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ฉีดเข้าบัสอื่น ๆ (P_{av}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสอื่น ๆ (SD_p) กำหนดขาออกคือ ATC ซึ่งแสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.2 ขาเข้าของ ANFIS รูปแบบที่ 2 สำหรับหัวข้อ 7.1

รูปแบบที่ 3

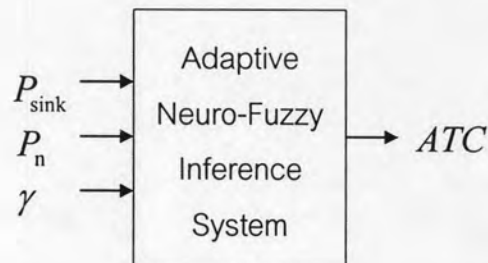
เป็นรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอ โดยกำหนดขาเข้าคือ กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต้นทาง (P_{source}) กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทาง (P_{sink}) กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ฉีดเข้าบัสอื่น ๆ (P_{av}) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสอื่น ๆ (SD_p) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ($loss$) กำหนดขาออกคือ ATC ซึ่งแสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.3 ขาเข้าของ ANFIS รูปแบบที่ 3 สำหรับหัวข้อ 7.1

รูปแบบที่ 4

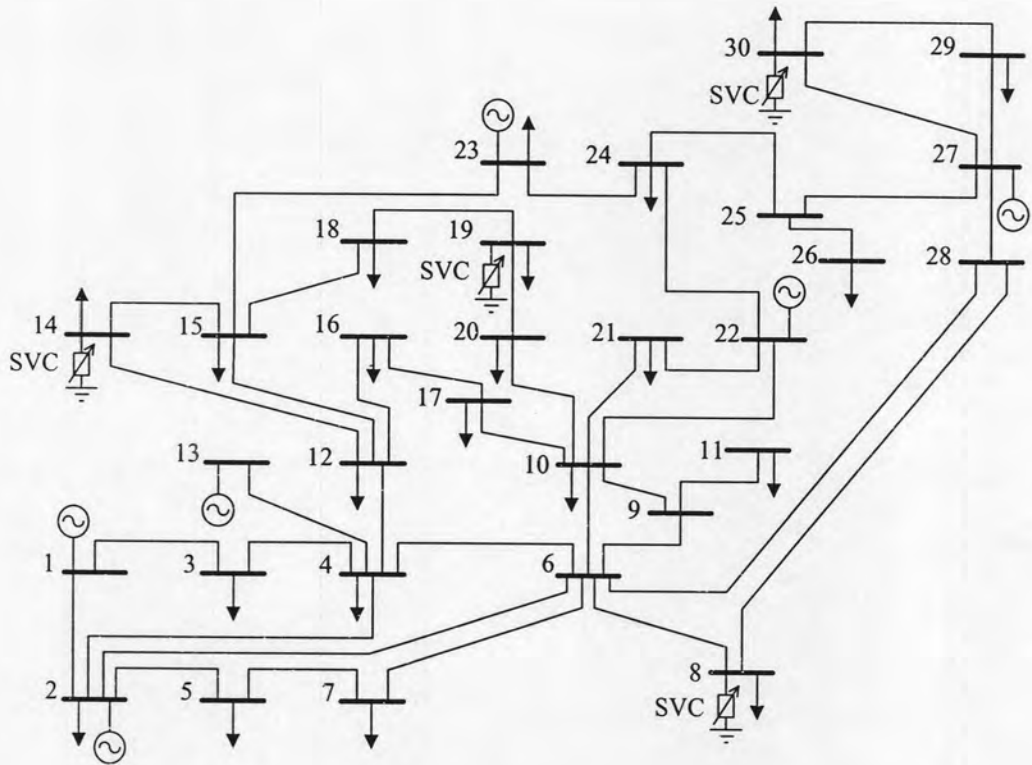
กำหนดขาเข้าแบบเก่า (Vinod Kumar et al.) ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทาง (P_{sink}) กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสข้างเคียง (P_n) ซึ่งในที่นี้คือบัสที่ 2 และดัชนีเอนกประสงค์ (γ) กำหนดขาออกคือ ATC ซึ่งแสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.4 ขาเข้าของ ANFIS รูปแบบที่ 4 สำหรับหัวข้อ 7.1

7.1.2 ระบบที่ใช้ทดสอบและการสร้างข้อมูลตัวอย่าง

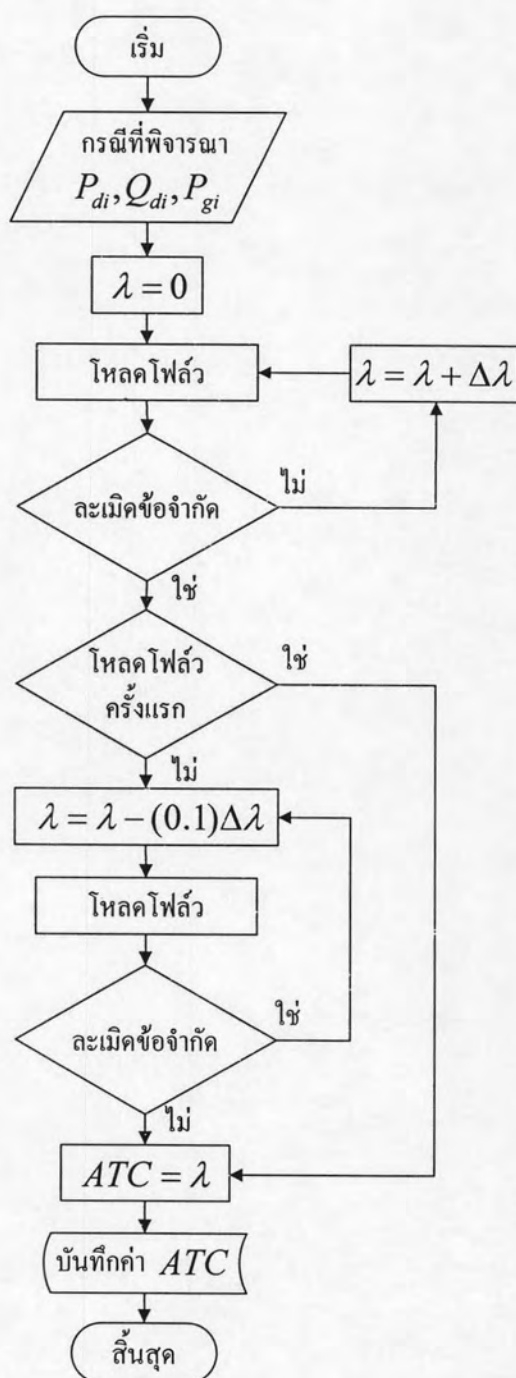
การทดสอบใช้ระบบทดสอบ 30 บัสจากโปรแกรม MATPOWER 3.0 โดยติดตั้ง SVC ที่ บัส 8 14 19 และ 30 และกำหนดให้สามารถจ่ายและรับกำลังรีแอกทีฟได้ 50 MVAR การทดสอบพิจารณาค่า ATC ระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 30



รูปที่ 7.5 ระบบทดสอบ 30 บัส

ข้อมูลตัวอย่างที่จะสร้างขึ้นประกอบด้วย ข้อมูลโหลดและข้อมูลกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การสร้างข้อมูลตัวอย่างเริ่มต้นโดยการสร้างกรณีโหลดและกำลังการผลิตพื้นฐาน 6 กรณีที่ไม่ละเมิดขีดจำกัดทางด้านแรงดันของบัสแต่ละบัส และไม่ละเมิดขีดจำกัดทางด้านความร้อนของสายส่งแต่ละเส้น จากนั้นสร้างกรณีเพิ่มเติม โดยคงอัตราส่วนของโหลดและกำลังการผลิตพื้นฐานทั้ง 6 กรณี แล้วปรับระดับโหลดและกำลังการผลิตจากระดับโหลดร้อยละ 1 ของกำลังการผลิตทั้งหมด ไปจนถึงร้อยละ 100 ของกำลังการผลิตทั้งหมด จะได้กรณีโหลดและกำลังการผลิตตัวอย่างทั้งหมด 600 กรณี

นำกรณีสถานะต่าง ๆ มาคำนวณ ATC ด้วยวิธี RPF ทั้งนี้สามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ดังรูปด้านล่าง โดยการทดสอบนี้กำหนดค่า $\Delta\lambda$ มีค่าเป็น 1 MW



รูปที่ 7.6 ขั้นตอนในการคำนวณ ATC

หลังจากได้ค่า ATC ที่กรณีโหลดแบบต่าง ๆ จึงแยกข้อมูลที่ได้เป็นสองกลุ่มคือข้อมูลฝึกสอน (training data) และข้อมูลตรวจสอบ (checking data) โดยข้อมูลตรวจสอบจะมีการตัดกรณีที่มีค่า ATC เท่ากับ 0 และกรณีที่ค่า ATC มีค่ามากที่สุดออกไป จากขั้นตอนนี้จึงได้ข้อมูลฝึกสอนจำนวน 450 กรณี และข้อมูลตรวจสอบจำนวน 89 กรณี จากนั้นจึงปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบที่ใช้ในการทดสอบ

ขาเข้ารูปแบบที่ 1, 2 และ 3 เป็นการกำหนดขาเข้าตามรูปแบบที่นำเสนอในบทก่อนหน้า
ซึ่งข้อมูลขาเข้าของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต้นทาง ($[P_{source}]$) คำนวณได้ดังนี้

$$[P_{source}]_{trn} = [P_{g,source}]_{trn} - [P_{d,source}]_{trn} \quad (7.1)$$

$$[P_{source}]_{chk} = [P_{g,source}]_{chk} - [P_{d,source}]_{chk} \quad (7.2)$$

โดย

$[P_{source}]_{trn}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต้นทางในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)
$[P_{g,source}]_{trn}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตที่บัสต้นทางในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)
$[P_{d,source}]_{trn}$	คือ ข้อมูลโหลดที่บัสต้นทางในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)
$[P_{source}]_{chk}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต้นทางในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)
$[P_{g,source}]_{chk}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตที่บัสต้นทางในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)
$[P_{d,source}]_{chk}$	คือ ข้อมูลโหลดที่บัสต้นทางในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)

ข้อมูลขาเข้าของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทาง ($[P_{sink}]$) คำนวณได้ดังนี้

$$[P_{sink}]_{trn} = [P_{g,sink}]_{trn} - [P_{d,sink}]_{trn} \quad (7.3)$$

$$[P_{sink}]_{chk} = [P_{g,sink}]_{chk} - [P_{d,sink}]_{chk} \quad (7.4)$$

โดย

$[P_{sink}]_{trn}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทางในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)
$[P_{g,sink}]_{trn}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตที่บัสปลายทางในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)
$[P_{d,sink}]_{trn}$	คือ ข้อมูลโหลดที่บัสปลายทางในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)
$[P_{sink}]_{chk}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทางในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)
$[P_{g,sink}]_{chk}$	คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตที่บัสปลายทางในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)
$[P_{d,sink}]_{chk}$	คือ ข้อมูลโหลดที่บัสปลายทางในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)

คำนวณค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัส (P_{av}) แต่ละกรณีตัวอย่างด้วย 6.7 จะได้

$$P_{av,k} = \frac{\sum_{i=1, i \neq N_{source}, N_{sink}}^N P_{i,k}}{N-2} \quad ; 1 \leq k \leq K_{trn} \quad (7.5)$$

$$P_{av,l} = \frac{\sum_{i=1, i \neq N_{source}, N_{sink}}^N P_{i,l}}{N-2} ; 1 \leq l \leq L_{chk} \quad (7.6)$$

โดย

$P_{av,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของบัสต่าง ๆ นอกเหนือจากบัสต้นทางและบัสปลายทาง ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ k (MW)

$P_{i,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสที่ i ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ k (MW)

K_{trn} คือ จำนวนข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด

$P_{av,l}$ คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของบัสต่าง ๆ นอกเหนือจากบัสต้นทางและบัสปลายทางของข้อมูลตรวจสอบกรณีที่ l (MW)

$P_{i,l}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสที่ i ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ l (MW)

L_{chk} คือ จำนวนข้อมูลตรวจสอบทั้งหมด

N คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบ

คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต่าง ๆ (SD_p) แต่ละกรณีตัวอย่างด้วย 6.8 จะได้

$$SD_{P,k} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, i \neq N_{source}, N_{sink}}^N (P_{i,k} - P_{av,k})^2}{((N-2)-1)}} ; 1 \leq k \leq K_{trn} \quad (7.7)$$

$$SD_{P,l} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, i \neq N_{source}, N_{sink}}^N (P_{i,l} - P_{av,l})^2}{((N-2)-1)}} ; 1 \leq l \leq L_{chk} \quad (7.8)$$

โดย

$SD_{P,k}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต่าง ๆ สำหรับข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ k (MW)

$SD_{P,l}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสต่าง ๆ สำหรับข้อมูลตรวจสอบกรณีที่ l (MW)

คำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ($loss$) ทุกกรณีตัวอย่างด้วย 6.9 จะได้

$$loss_k = \sum_{i=1}^N P_{gi,k} - \sum_{i=1}^N P_{di,k} \quad ; 1 \leq k \leq K_{irn} \quad (7.9)$$

$$loss_l = \sum_{i=1}^N P_{gi,l} - \sum_{i=1}^N P_{di,l} \quad ; 1 \leq l \leq L_{chk} \quad (7.10)$$

โดย

$loss_k$ คือ กำลังสูญเสียในระบบของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ k (MW)

$P_{gi,k}$ คือ กำลังผลิตที่บัส i ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ k (MW)

$P_{di,k}$ คือ โหลดที่บัส i ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ k (MW)

$loss_l$ คือ กำลังสูญเสียในระบบของข้อมูลตรวจสอบกรณีที่ l (MW)

$P_{gi,l}$ คือ กำลังผลิตที่บัส i ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ l (MW)

$P_{di,l}$ คือ โหลดที่บัส i ของข้อมูลฝึกสอนกรณีที่ l (MW)

ขาเข้ารูปแบบที่ 4 เป็นการกำหนดขาเข้าตามรูปแบบเก่า ซึ่งข้อมูลขาเข้าที่เป็นกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสปลายทาง (P_{sink}) กำหนดได้ด้วย 7.3 และ 7.4 สำหรับข้อมูลขาเข้าที่เป็นกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสข้างเคียง (P_n) จะต้องหาบัสข้างเคียงตามการนิยามของ Khairuddin et al. โดยหาเส้นทางจากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทางที่มีอิมพีแดนซ์น้อยที่สุด ในที่นี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบ dijkstra [24] เพื่อหาเส้นทางที่ต้องการ

เส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์น้อยที่สุดเรียงหมายเลขบัสจากต้นทางไปปลายทางคือ บัสที่ 1, 2, 6, 28, 27 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งบัสที่อยู่ใกล้บัสต้นทางที่สุดและมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่คือบัสที่ 2 จึงกำหนดบัสที่ 2 ให้เป็นบัสข้างเคียง และคำนวณข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสข้างเคียงดังนี้

$$[P_n]_{irn} = [P_{g,n}]_{irn} - [P_{d,n}]_{irn} \quad (7.11)$$

$$[P_n]_{chk} = [P_{g,n}]_{chk} - [P_{d,n}]_{chk} \quad (7.12)$$

โดย

$[P_n]_{irn}$ คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสข้างเคียงในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)

$[P_{g,n}]_{irn}$ คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตที่บัสข้างเคียงในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)

$[P_{d,n}]_{irn}$ คือ ข้อมูลโหลดที่บัสข้างเคียงในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (MW)

$[P_n]_{chk}$ คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสข้างเคียงในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)

$[P_{g,n}]_{chk}$ คือ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตที่บัสข้างเคียงในส่วนของข้อมูลตรวจสอบ (MW)

$[P_{d,n}]_{chk}$ คือ ข้อมูลโหลดที่บัสข้างเคียงในส่วนของคุณข้อมูลตรวจสอบ (MW)

สำหรับดัชนีอนุกรมประสงค์ (γ) ในแต่ละกรณีตัวอย่างคำนวณด้วย 5.2 จะได้

$$\gamma_k = \frac{\sum_{i=1, i \neq N_s, N_n}^N P_{di,k}}{A_{\max}} \quad ; 1 \leq k \leq K_{irn} \quad (7.13)$$

$$\gamma_l = \frac{\sum_{i=1, i \neq N_s, N_n}^N P_{di,l}}{A_{\max}} \quad ; 1 \leq l \leq L_{chk} \quad (7.14)$$

โดย

γ_k คือ ดัชนีอนุกรมประสงค์ของคุณฝึกสอนกรณี k

γ_l คือ ดัชนีอนุกรมประสงค์ของคุณตรวจสอบกรณี l

A_{\max} คือ ขีดจำกัดด้านความร้อนของสายส่งที่สูงที่สุด สำหรับการทดสอบนี้มีค่า 130 MVA

7.1.3 การสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการคำนวณค่า ATC ด้วย ANFIS จะต้องสร้าง ANFIS ขึ้นโดยการกำหนดจำนวนฟังก์ชันเซต ชนิดของฟังก์ชันเซต และพรีมิสพารามิเตอร์เริ่มต้นของ ANFIS ซึ่งค่าพรีมิสพารามิเตอร์ที่สร้างขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปหลังจากที่มีการฝึกสอน ANFIS

การกำหนดพรีมิสพารามิเตอร์เริ่มต้น จะต้องตรวจสอบช่วงของค่าขาเข้าจากข้อมูลฝึกสอน ชนิดของฟังก์ชันเซตและจำนวนฟังก์ชันเซตที่กำหนดไว้ แล้วจึงกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นจากข้อมูลฝึกสอนที่ได้จึงนำมาช่วยในการสร้าง ANFIS โดยใช้ชุดคำสั่ง Fuzzy Logic Toolbox ในโปรแกรม MATLAB [23] ซึ่ง ANFIS ที่สร้างขึ้นจะมีรูปแบบขาเข้าแตกต่างกันจำนวน 4 ชุด โดยในการทดสอบนี้กำหนดให้ขาเข้าทั้งหมดมีจำนวนฟังก์ชันเซตที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมจำนวน 3 เซต และกำหนดให้ขาออกของกฎแต่ละกฎเป็นสมการโพลีโนเมียลลำดับที่หนึ่ง จะได้ ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบมีข้อมูลดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 7.1 ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อที่ 7.1

ANFIS	จำนวน ขาเข้า	จำนวน ขาออก	ฟังก์ชันความ เป็นสมาชิก	จำนวน พีชชีเซต	จำนวนกฎ	จำนวน พารามิเตอร์
รูปแบบที่ 1	3	1	สามเหลี่ยม	3 3 3	27	135
รูปแบบที่ 2	4	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3	81	441
รูปแบบที่ 3	5	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3 3	243	1503
รูปแบบที่ 4	3	1	สามเหลี่ยม	3 3 3	27	135

หลังจากที่ได้ ANFIS ทั้ง 4 ชุดแล้วจึงนำข้อมูลฝึกสอนที่เตรียมไว้ทั้ง 4 ชุดไปฝึกสอน ANFIS โดยใช้ Fuzzy Logic Toolbox ฝึกสอนแบบไฮบริดจำนวน 10 รอบ โดยในแต่ละรอบจะมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) หรือ RMSE ของค่า ATC ที่ได้จากการป้อนข้อมูลฝึกสอนสู่ ANFIS เทียบกับค่า ATC ที่เป็นค่าตัวอย่าง ในข้อมูลฝึกสอน ค่า RMSE ในแต่ละรอบของการฝึกสอนแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.2 ค่า RMSE จากการฝึกสอนแต่ละรอบในการทดสอบหัวข้อที่ 7.1

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	1.108	1.080	1.076	1.068	1.049	1.046	1.046	1.032	1.026	1.008
รูปแบบที่ 2	0.716	0.710	0.710	0.706	0.693	0.692	0.692	0.674	0.622	0.637
รูปแบบที่ 3	0.627	0.619	0.617	0.611	0.607	0.606	0.605	0.605	0.605	0.606
รูปแบบที่ 4	1.189	1.185	1.183	1.182	1.181	1.179	1.177	1.172	1.163	1.155

ในการนำ ANFIS ไปใช้งานจะเลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนและให้ค่า RMSE น้อยที่สุด ดังนั้นรูปแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 เลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอน 10, 9, 9 และ 10 รอบ ตามลำดับ

7.1.4 การตรวจสอบค่า ATC ขาออกจาก ANFIS

ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ขาออกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับกับค่า ATC ตัวอย่างของข้อมูลฝึกสอน อย่างไรก็ตามในการตรวจสอบการคำนวณค่า ATC ของ ANFIS จะใช้ข้อมูลตรวจสอบที่เตรียมไว้ซึ่งมีขาเข้าแตกต่างจากขาเข้าของข้อมูลฝึกสอน

เมื่อป้อนข้อมูลตรวจสอบให้กับ ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบ นำค่า ATC ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า ATC ของข้อมูลตรวจสอบ โดยใช้ดัชนีดังนี้

- 1.) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error) ดัชนีนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS กับค่า ATC ของข้อมูลตรวจสอบที่ได้จากวิธี RPF ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ATC_{i,ANFIS} - ATC_{i,RPF}| \quad (7.15)$$

โดย

MAE	คือ ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MW)
$ATC_{i,ANFIS}$	คือ ATC จากการคำนวณหาข้อมูลตรวจสอบที่ i โดย ANFIS (MW)
$ATC_{i,RPF}$	คือ ATC ในข้อมูลตรวจสอบที่ i ซึ่งได้จากวิธี RPF (MW)
N	คือ จำนวนหาเข้าของข้อมูลตรวจสอบ

- 2.) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงสุด (Maximum Absolute Error) เป็นดัชนีที่ช่วยให้ทราบว่าข้อมูล ATC ขาออกจาก ANFIS มีค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่าไร ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$AE_{max} = \max_{1 \leq i \leq N} |ATC_{i,ANFIS} - ATC_{i,RPF}| \quad (7.16)$$

โดย

AE_{max}	คือ ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงสุด (MW)
$ATC_{i,ANFIS}$	คือ ATC จากการคำนวณหาข้อมูลตรวจสอบที่ i โดย ANFIS (MW)
$ATC_{i,RPF}$	คือ ATC ในข้อมูลตรวจสอบที่ i ซึ่งได้จากวิธี RPF (MW)
N	คือ จำนวนหาเข้าของข้อมูลตรวจสอบ

- 3.) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ต่ำสุด (Minimum Absolute Error) เป็นค่าที่แสดงถึงข้อมูล ATC ขาออกของ ANFIS มีค่าใกล้เคียงกับค่า ATC ตรวจสอบมากที่สุดเท่าไร ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$AE_{min} = \min_{1 \leq i \leq N} |ATC_{i,ANFIS} - ATC_{i,RPF}| \quad (7.17)$$

โดย

AE_{min}	คือ ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ต่ำสุด (MW)
$ATC_{i,ANFIS}$	คือ ATC จากการคำนวณหาเข้าข้อมูลตรวจสอบที่ i โดย ANFIS (MW)
$ATC_{i,RPF}$	คือ ATC ในข้อมูลตรวจสอบที่ i ซึ่งได้จากวิธี RPF (MW)
N	คือ จำนวนหาเข้าของข้อมูลตรวจสอบ

- 4.) ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าความเป็นจริงสูงสุด(Maximum Over Error) ดัชนีนี้บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนสูงสุดของ ATC ที่คำนวณจาก ANFIS พิจารณาเฉพาะกรณีที่คำนวณได้ค่ามากกว่าข้อมูลตรวจสอบ โดยคำนวณได้ดังนี้

$$OE_{max} = \max_{1 < j < N_o} (ATC_{j,ANFIS} - ATC_{j,RPF}) \quad (7.18)$$

โดย

OE_{max}	คือ ความคลาดเคลื่อนมากกว่าความเป็นจริงสูงสุด (MW)
$ATC_{j,ANFIS}$	คือ ATC ที่สูงกว่าความเป็นจริง จากการคำนวณหาเข้าของข้อมูลตรวจสอบที่ j โดย ANFIS (MW)
$ATC_{j,RPF}$	คือ ค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบที่ j ซึ่งได้จากการคำนวณด้วย RPF (MW)
N_o	คือ จำนวนข้อมูลตรวจสอบที่ให้ค่า ATC สูงกว่าความเป็นจริง

- 5.) ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าความเป็นจริงสูงสุด(Maximum Under Error) ดัชนีนี้บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนสูงสุดของ ATC ที่คำนวณจาก ANFIS พิจารณาเฉพาะกรณีที่คำนวณได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลตรวจสอบ โดยคำนวณได้ดังนี้

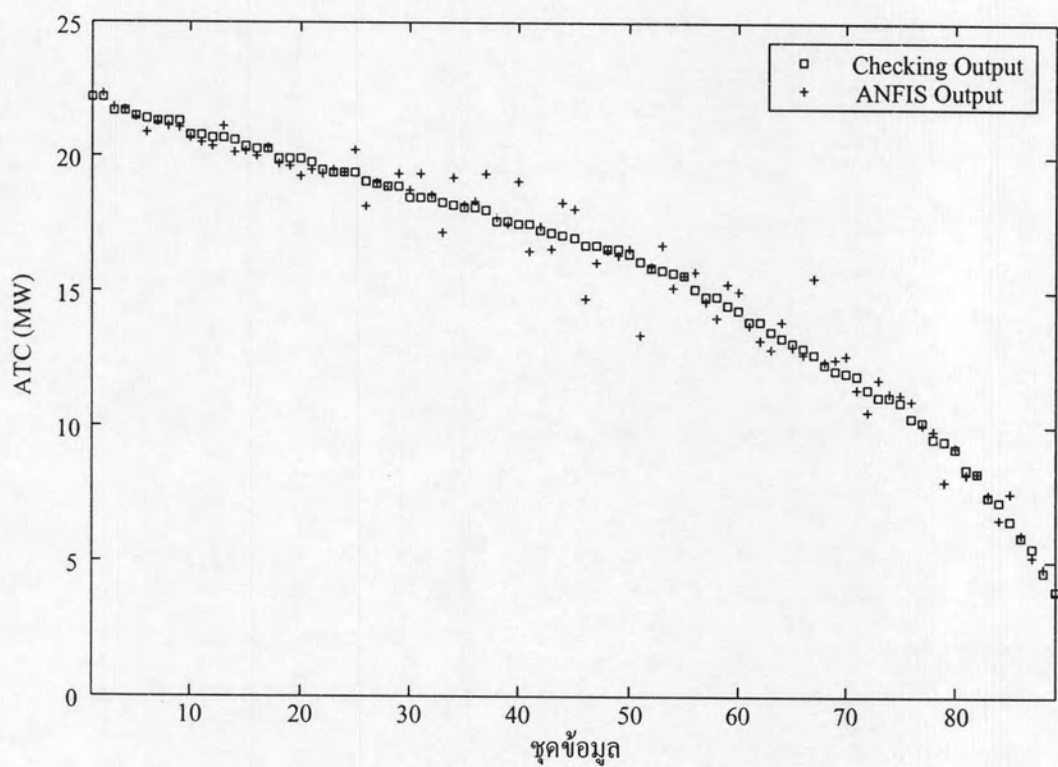
$$UE_{max} = \min_{1 < k < N_u} (ATC_{k,ANFIS} - ATC_{k,RPF}) \quad (7.19)$$

โดย

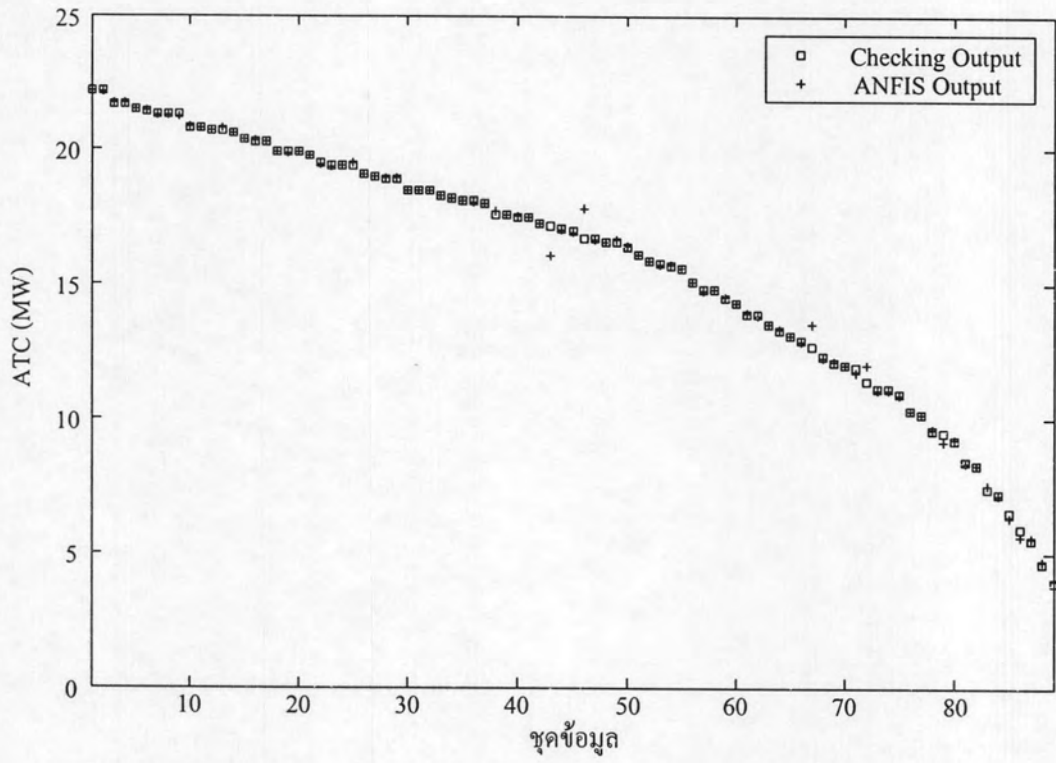
UE_{max}	คือ ความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าความเป็นจริงสูงสุด
$ATC_{k,ANFIS}$	คือ ATC ที่ต่ำกว่าความเป็นจริง จากการคำนวณหาเข้าของข้อมูลตรวจสอบที่ k โดย ANFIS (MW)
$ATC_{k,RPF}$	คือ ATC ในข้อมูลตรวจสอบที่ k ซึ่งได้จากการคำนวณด้วย RPF (MW)
N_u	คือ จำนวนข้อมูลตรวจสอบที่ให้ค่า ATC ต่ำกว่าความเป็นจริง

7.1.5 ผลการทดสอบ

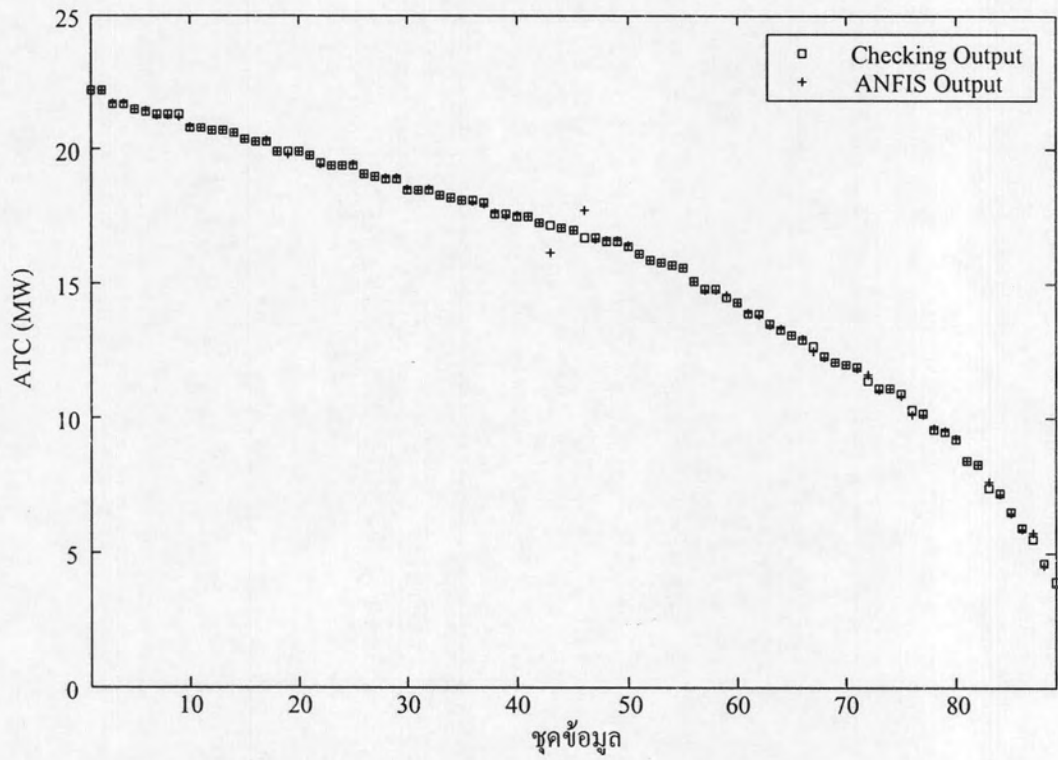
หลังจากนำ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมาคำนวณ ATC ด้วยข้อมูลขาเข้าตรวจสอบ ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบเปรียบเทียบกับค่า ATC ของข้อมูลตรวจสอบแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



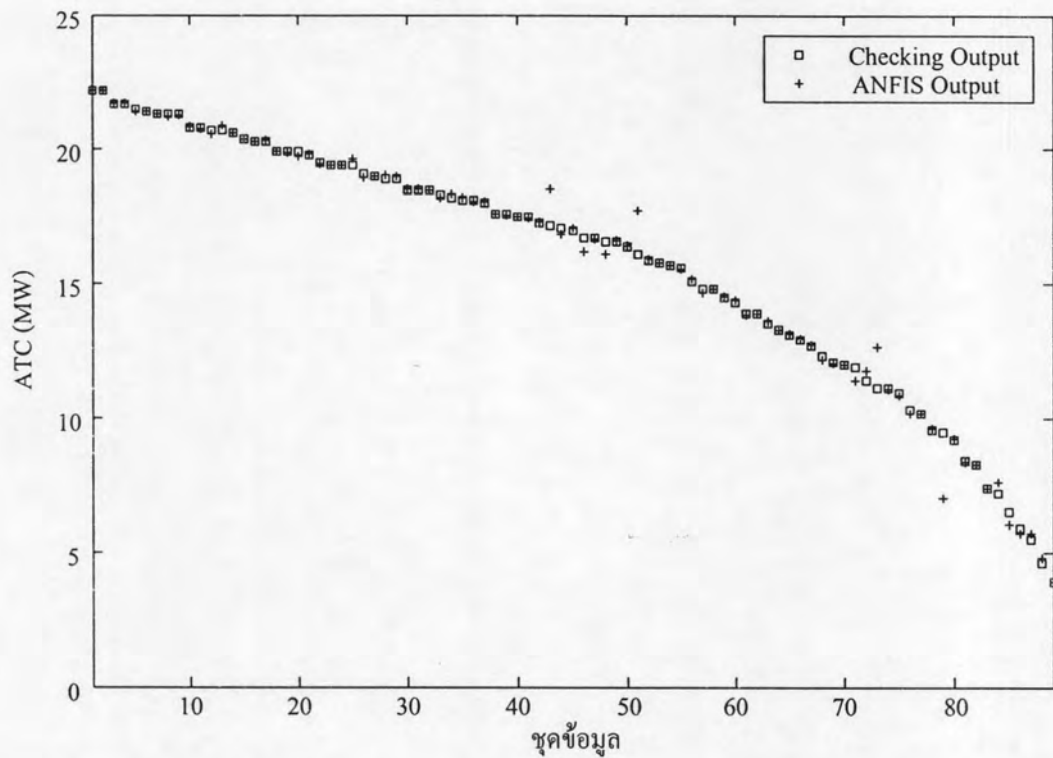
รูปที่ 7.7 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.8 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.9 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้าหารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.10 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 4 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ

จากนั้นนำค่า ATC ที่ได้จากขาออกของ ANFIS มาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตามดัชนีต่างๆ ที่กำหนดไว้ ข้อมูลในการทดสอบ ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบแสดงได้ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบหัวข้อที่ 7.1

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	3.34	98.77	1322.89	3.31
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
MAE (MW)	0.48	0.08	0.06	0.16
AE_{max} (MW)	2.83	1.15	1.05	2.45
AE_{min} (MW)	0.0015	0.0016	0.0009	0.0003
OE_{max} (MW)	2.83	1.12	1.04	1.63
UE_{max} (MW)	-2.73	-1.15	-1.05	-2.45

7.1.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย พบว่า ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 1 ให้ค่า MAE มากที่สุด เมื่อพิจารณารูปแบบขาเข้าที่บ่งบอกถึงสภาวะระบบมากขึ้น ใน ANFIS รูปแบบที่ 2 และ รูปแบบที่ 3 พบว่าสามารถปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนให้ดีขึ้นได้ โดยค่า MAE มีค่าลดลง นอกจากนี้จากค่า AE_{max} OE_{max} และ UE_{max} แสดงให้เห็นว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ลดลง และเมื่อพิจารณาค่า AE_{min} ก็มีค่าลดลงเช่นกันนั่นหมายความว่า ATC ที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่า ATC ตรวจสอบมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า MAE ของวิธีกำหนดขาเข้าที่นำเสนอในรูปแบบที่ 3 กับวิธีกำหนดขาเข้าที่เคยมีการนำเสนอในรูปแบบที่ 4 พบว่า ค่า MAE ของรูปแบบที่ 3 มีค่าน้อยกว่าค่า MAE ในรูปแบบที่ 4

หากเปรียบเทียบเวลาในการฝึกสอน ANFIS พบว่าการเพิ่มขาเข้าให้แก่ ANFIS จะใช้เวลาในการฝึกสอนมากขึ้นทวีคูณ ANFIS อย่างไรก็ตาม ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการคำนวณค่า ATC น้อยมาก

7.1.7 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการกำหนดขาเข้าที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงการคำนวณ ATC ด้วย ANFIS ได้ โดยการกำหนดขาเข้าที่สะท้อนถึงข้อมูลของระบบทั้งหมดจะทำให้การคำนวณค่า ATC มีความแม่นยำขึ้น นอกจากนี้ในการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบขาเข้าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถคำนวณ ATC ได้ใกล้เคียงกับค่า ATC ตรวจสอบมากกว่าวิธีการที่เคยมีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้

7.2 การทดสอบรูปแบบขาเข้าของ ANFIS ในกรณีที่มี TCSC อยู่ในระบบ

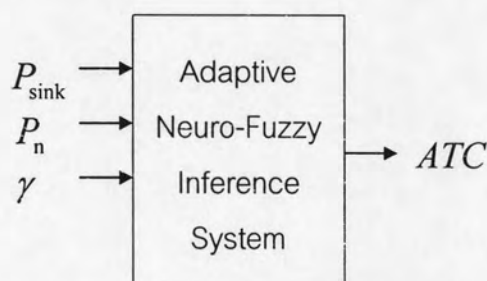
ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังมี TCSC ติดตั้งอยู่ในระบบ รีแอกแตนซ์ของ TCSC จะมีผลต่อค่า ATC จึงออกแบบการทดสอบนี้ขึ้นเพื่อทดสอบรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอในกรณีที่ระบบมี TCSC ติดตั้งอยู่ โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างกรณีที่ไม่ได้กำหนดรีแอกแตนซ์ของ TCSC เป็นขาเข้าของ ANFIS กับกรณีที่กำหนดรีแอกแตนซ์ของ TCSC เป็นขาเข้าของ ANFIS และจะนำรูปแบบขาเข้าแบบเก่า (Vinod Kumar et al.) มาทดสอบในลักษณะเดียวกัน

7.2.1 รูปแบบขาเข้าในการทดสอบ

ขาเข้าที่ทดสอบยังคงใช้ขาเข้าที่นำเสนอและขาเข้ารูปแบบเก่าโดยเพิ่มรีแอกแตนส์ของ TCSC เป็นขาเข้า รูปแบบขาเข้าที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 4 รูปแบบดังนี้

รูปแบบที่ 1

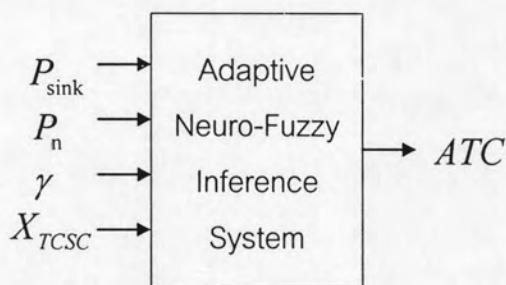
กำหนดขาเข้ารูปแบบเก่า โดยไม่มีรีแอกแตนส์ของ TCSC เป็นขาเข้าของ ANFIS แสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.11 รูปแบบที่ 1 ของ ANFIS ที่ทดสอบในหัวข้อที่ 7.2

รูปแบบที่ 2

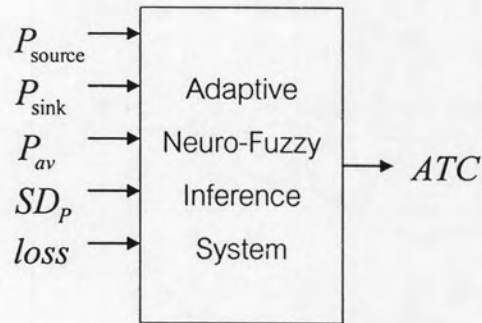
กำหนดขาเข้าเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 แต่เพิ่มรีแอกแตนส์ของ TCSC (X_{TCSC}) เป็นขาเข้าของ ANFIS แสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.12 รูปแบบที่ 2 ของ ANFIS ที่ทดสอบในหัวข้อที่ 7.2

รูปแบบที่ 3

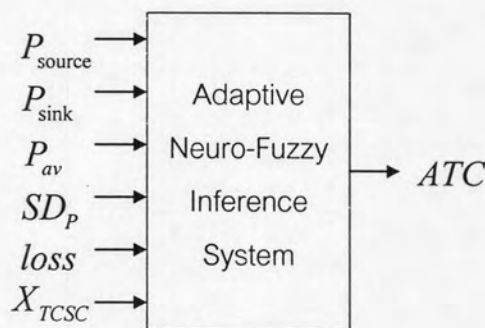
รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอที่ไม่มีรีแอกแตนส์ของ TCSC เป็นขาเข้าของ ANFIS แสดงดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.13 รูปแบบที่ 3 ของ ANFIS ที่ทดสอบในหัวข้อที่ 7.2

รูปแบบที่ 4

รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอที่เพิ่มรีแอกแตนซ์ของ TCSC (X_{TCSC}) เป็นขาเข้าของ ANFIS แสดงดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 7.14 รูปแบบที่ 4 ของ ANFIS ที่ทดสอบในหัวข้อที่ 7.2

7.2.2 ระบบที่ใช้ทดสอบและการสร้างข้อมูลตัวอย่าง

ใช้ระบบทดสอบ 30 บัสที่ใช้ทดสอบในหัวข้อที่ 7.1 ซึ่งติด TCSC เพิ่มที่สายส่งระหว่างบัสที่ 27 กับบัสที่ 30 และกำหนดให้

$$-0.5X \leq X_{TCSC} \leq 0.5X \quad (7.20)$$

โดย

X_{TCSC} คือ รีแอกแตนซ์ของ TCSC (p.u.)

X คือ รีแอกแตนซ์ของสายส่งเส้นที่ติดตั้ง TCSC (p.u.)

เมื่อแทนค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งระหว่างบัสที่ 27 กับบัสที่ 30 ซึ่งมีค่า 0.6 p.u. ลงใน 7.20 จะได้

$$-0.3 \leq X_{TCSC} \leq 0.3 \quad \text{p.u.} \quad (7.21)$$

การทดสอบใช้ข้อมูล ATC ระหว่างบัสที่ 1 กับบัสที่ 30 โดยสร้างข้อมูลตัวอย่างเริ่มต้นด้วยข้อมูลพื้นฐาน 1 กรณี แล้วปรับระดับโหลดและกำลังการผลิตจากระดับโหลดร้อยละ 1 ของกำลังการผลิตทั้งหมด ไปจนถึงร้อยละ 100 ของกำลังการผลิตทั้งหมด จะได้กรณีโหลดและกำลังการผลิตที่แตกต่างกันทั้งหมด 100 กรณี ในแต่ละกรณีจะนำมาใช้คำนวณค่า ATC ด้วยวิธี RPF โดยตั้งค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC เริ่มต้นที่ $-0.5 X$ และเพิ่มค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC ทีละ $0.1 X$ จนกระทั่งถึงค่า $0.5 X$ ค่าวนค่า ATC ในการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC แต่ละค่า จะได้ค่า ATC จำนวน 11 ค่าต่อกรณีโหลดและกำลังการผลิต 1 กรณี รวมข้อมูลตัวอย่างที่สร้างขึ้นได้ทั้งหมด 1,100 กรณี ขั้นตอนในการคำนวณ ATC ในกรณีที่มี TCSC คิดตั้งอยู่แสดงได้ดังรูป

จากนั้นจึงแบ่งข้อมูลตัวอย่างที่ได้เป็น 2 กลุ่มคือข้อมูลฝึกสอน (training data) และข้อมูลตรวจสอบ (checking data) โดยแบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอนจำนวน 875 กรณี และข้อมูลตรวจสอบจำนวน 225 กรณี

แปลงข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบขาเข้าตามรูปแบบที่ 1 และ 2 ดังนี้

- 1.) จำนวน $[P_{sink}]_{trn}$ และ $[P_{sink}]_{chk}$ ด้วย 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ
 - 2.) จำนวน $[P_n]_{trn}$ และ $[P_n]_{chk}$ ด้วย 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ
 - 3.) จำนวน γ_k และ γ_l ด้วย 7.13 และ 7.14 ตามลำดับ
 - 4.) ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC ในแต่ละกรณีสามารถนำมาใช้เป็นขาเข้าได้ทันที
- แปลงข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบขาเข้าตามรูปแบบที่ 3 และ 4 ดังนี้

- 1.) จำนวน $[P_{source}]_{trn}$ และ $[P_{source}]_{chk}$ ด้วย 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ
- 2.) จำนวน $[P_{sink}]_{trn}$ และ $[P_{sink}]_{chk}$ ด้วย 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ
- 3.) จำนวน $P_{av,k}$ และ $P_{av,l}$ ด้วย 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ
- 4.) จำนวน $SD_{P,k}$ และ $SD_{P,l}$ ด้วย 7.7 และ 7.8 ตามลำดับ
- 5.) จำนวน $loss_k$ และ $loss_l$ ด้วย 7.9 และ 7.10 ตามลำดับ
- 6.) ค่ารีแอกแตนซ์ของ TCSC ในแต่ละกรณีสามารถนำมาใช้เป็นขาเข้าได้ทันที

7.2.3 การสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ

นำข้อมูลฝึกสอนที่ได้มาสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบด้วย Fuzzy Logic Toolbox กำหนดให้ขาเข้าทั้งหมดมีฟัซซีเซตรูปสามเหลี่ยมจำนวนขาเข้าละ 3 เซต และกำหนดขาออกของกฎแต่ละกฎเป็นสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่หนึ่ง จะได้ ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบดังตาราง

ตารางที่ 7.4 ANFIS ที่ใช้การทดสอบการกำหนดขาเข้าของ ANFIS ในกรณีที่มี TCSC อยู่ในระบบ

ANFIS	จำนวนขาเข้า	จำนวนขาออก	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	จำนวนฟัซซีเซต	จำนวนกฎ	จำนวนพารามิเตอร์
รูปแบบที่ 1	3	1	สามเหลี่ยม	3 3 3	27	135
รูปแบบที่ 2	4	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3	81	441
รูปแบบที่ 3	5	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3 3	243	1503
รูปแบบที่ 4	6	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3 3 3	729	5157

หลังจากได้ ANFIS ทั้ง 4 ชุดจึงฝึกสอน ANFIS ด้วยข้อมูลฝึกสอนที่เตรียมไว้สำหรับ ANFIS แต่ละชุด ด้วยชุดคำสั่ง Fuzzy Logic Toolbox โดยฝึกสอนแบบไฮบริดจำนวน 10 รอบ ค่า RMSE ที่ได้จากรอบการฝึกสอนต่าง ๆ แสดงดังตาราง

ตารางที่ 7.5 ค่า RMSE จากการฝึกสอนแต่ละรอบในการทดสอบหัวข้อที่ 7.2

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รูปแบบที่ 1	2.753	2.732	2.732	2.731	2.731	2.714	2.714	2.714	2.707	2.699
รูปแบบที่ 2	0.781	0.702	0.698	0.697	0.697	0.697	0.696	0.621	0.621	0.620
รูปแบบที่ 3	1.184	1.179	1.179	1.177	1.172	1.169	1.167	1.166	1.167	1.165
รูปแบบที่ 4	0.232	0.230	0.230	0.229	0.232	0.229	0.228	0.230	0.230	0.230

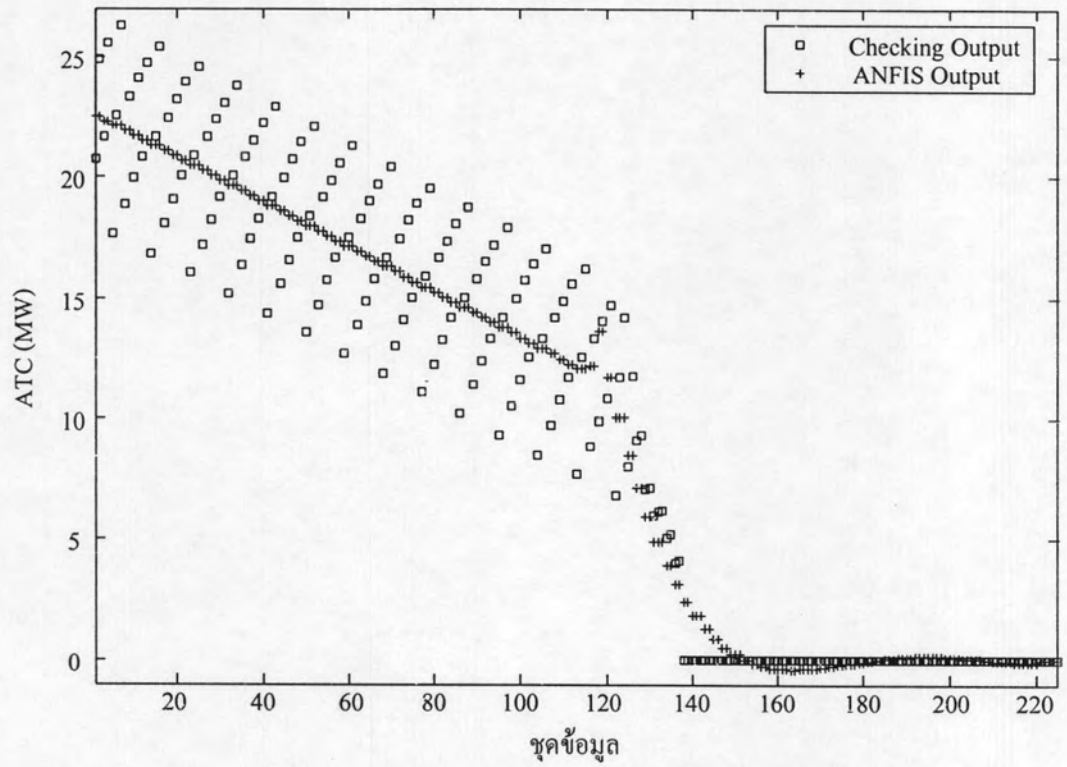
ในการนำ ANFIS ไปใช้งานจะเลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนและให้ค่า RMSE น้อยที่สุด ดังนั้นรูปแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 เลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอน 10, 10, 10 และ 7 รอบ ตามลำดับ

7.2.4 การตรวจสอบค่า ATC ขาออกจาก ANFIS

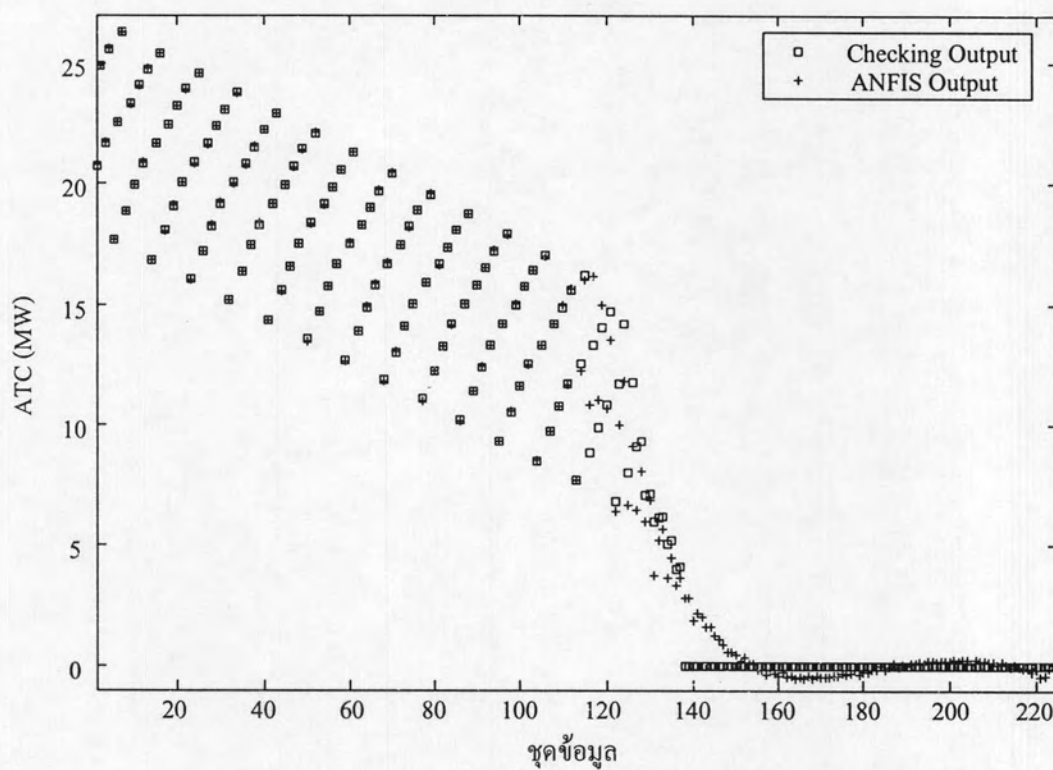
เมื่อได้โครงสร้าง ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบจึงทดสอบ ANFIS ด้วยข้อมูลตรวจสอบที่เตรียมไว้ ค่า ATC ขาออกที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ คำนวณหา MAE , AE_{max} , AE_{min} , OE_{max} และ UE_{max} ด้วย 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 และ 7.19 ตามลำดับ

7.2.5 ผลการทดสอบ

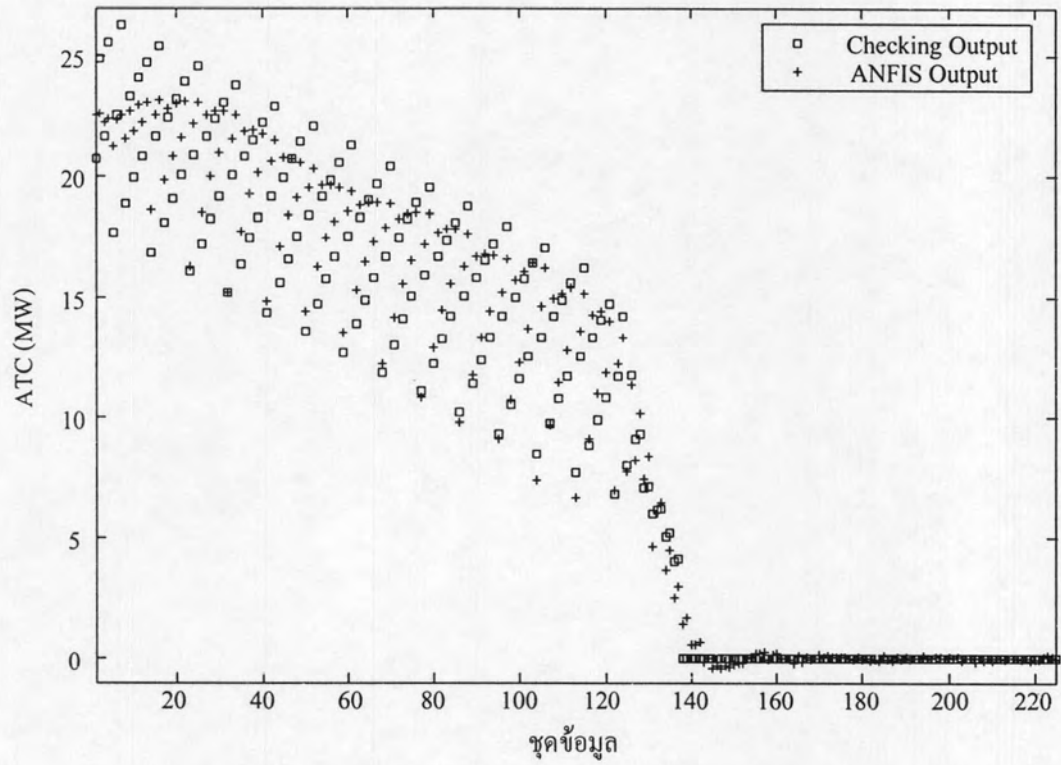
ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ในรูปแบบที่กำหนดแต่ละรูปแบบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



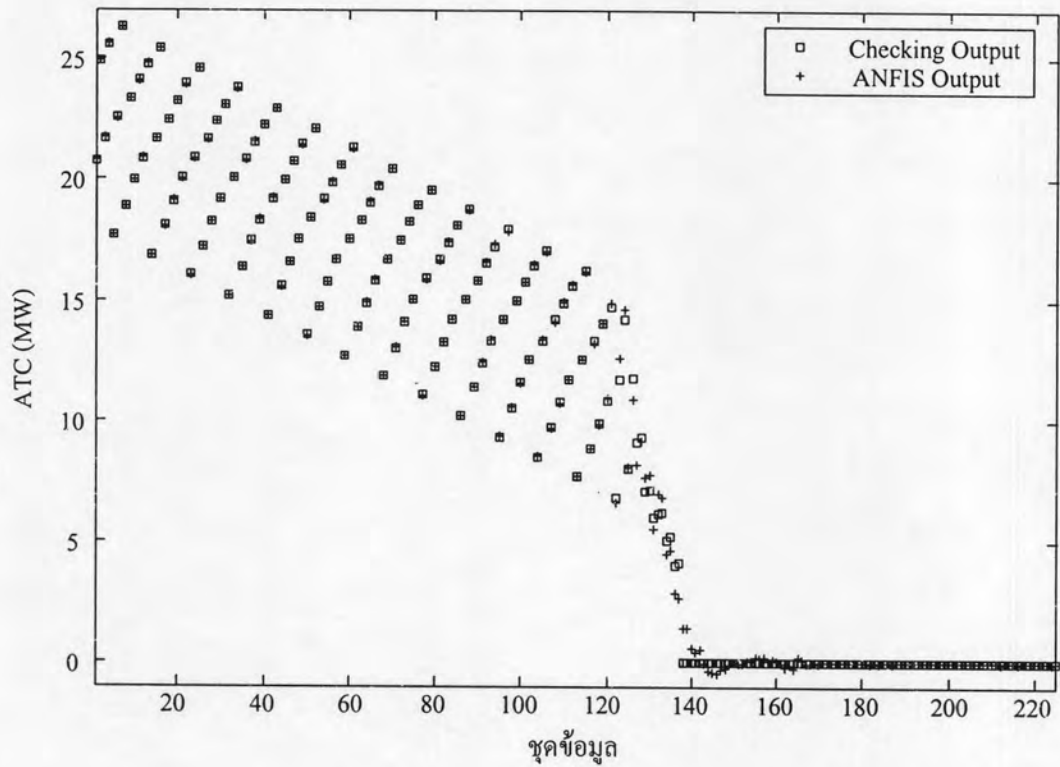
รูปที่ 7.16 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 1 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.2 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.17 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบที่ 2 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.2 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.18 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้หาเข้ารูปแบบที่ 3 ของการทดสอบในหัวข้อที่ 7.2 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.19 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้เข้ารูปแบบที่ 4 เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ

จากนั้นนำค่า ATC ที่ได้จากขาออกของ ANFIS มาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตามดัชนีต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 7.6 ผลการทดสอบหัวข้อที่ 7.2

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	6.72	200.58	2712.30	51298.00
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.03	0.06
MAE (MW)	1.51	0.32	0.68	0.12
AE_{max} (MW)	4.56	2.86	3.66	1.44
AE_{min} (MW)	0.0016	0.0003	0.0005	0.0002
OE_{max} (MW)	4.56	2.86	3.65	1.44
UE_{max} (MW)	-4.13	-2.62	-3.66	-1.43

7.2.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า การกำหนดค่าเข้ารูปแบบที่ 1 ใน ห้าค่า ATC ขาออกที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด และจากรูปที่ 7.16 ก็แสดงให้เห็นว่า ANFIS รูปแบบที่ 1 ไม่สามารถคำนวณค่า ATC ที่มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับรีแอกแตนส์ของ TCSC เนื่องจากการกำหนดค่าเข้าแบบเก่า จะไม่มีขาเข้าตัวใดที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงรีแอกแตนส์ของ TCSC

ขาเข้ารูปแบบที่ 2 มีการเพิ่มค่ารีแอกแตนส์ของ TCSC เป็นขาเข้าให้กับ ANFIS พบว่าทำให้ค่า ATC ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มขาเข้านี้ทำให้ ANFIS สามารถแยกแยะสถานะของระบบได้ดีขึ้น ค่ารีแอกแตนส์ของ TCSC ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ ANFIS ส่งค่า ATC ขาออกที่แตกต่างกันตามไปด้วย

สำหรับการกำหนดค่าเข้ารูปแบบที่ 3 ซึ่งเป็นการกำหนดค่าเข้าตามรูปแบบที่นำเสนอแต่ไม่ได้กำหนดให้รีแอกแตนส์ของ TCSC เป็นขาเข้า พบว่า ANFIS สามารถให้ค่า ATC ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ารูปแบบที่ 1 เนื่องจากขาเข้ารูปแบบที่ 3 มีขาเข้าที่เป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อมีการปรับค่ารีแอกแตนส์ของ TCSC ทำให้ ANFIS สามารถแยกแยะสถานะของระบบได้ ในขณะที่รูปแบบที่ 1 ไม่มีขาเข้าตัวใดที่มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับรีแอกแตนส์ของ TCSC อย่างไรก็ตามกำลังสูญเสียในระบบที่เปลี่ยนแปลงยังไม่สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนส์ของ TCSC โดยตรงจึงทำให้ความคลาดเคลื่อนของค่า ATC ในรูปแบบที่ 3 มีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อนของค่า ATC ในรูปแบบที่ 2

จากรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอ เมื่อกำหนดรีแอกแตนส์ของ TCSC เป็นขาเข้าเพิ่มเติมดังขาเข้ารูปแบบที่ 4 ผลการทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่า ATC ที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 3 และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบขาเข้าทุกรูปแบบที่ทำการทดสอบ

7.2.7 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากรณีที่มี TCSC ติดตั้งอยู่ในระบบ ค่า ATC จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับรีแอกแตนส์ของ TCSC ที่ใช้งานอยู่ในขณะนั้น การสร้าง ANFIS เพื่อใช้คำนวณค่า ATC จึงต้องมีขาเข้าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงรีแอกแตนส์ของ TCSC จึงจะทำให้ ANFIS สามารถคำนวณค่า ATC ได้อย่างถูกต้อง

7.3 การทดสอบชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันในการคำนวณ ATC

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของค่า ATC ที่คำนวณได้จาก ANFIS ในกรณีที่กำหนดชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแตกต่างกัน

7.3.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ในการทดสอบ

กำหนดให้ ANFIS จำนวน 4 ชุด ใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอมีขาเข้ารูปแบบเดียวกันกับรูปแบบที่ 3 ของการทดสอบหัวข้อ 7.1 โดย ANFIS แต่ละชุดจะกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตที่ขาเข้าแตกต่างกัน โดยฟังก์ชันที่ใช้ประกอบด้วย

- 1.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (Triangle MFs)
- 2.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid MFs)
- 3.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆัง (Bell MFs)
- 4.) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (Gaussian MFs)

7.3.2 ระบบที่ใช้ทดสอบและการสร้างข้อมูลตัวอย่าง

ใช้ระบบ 30 บิต และใช้ข้อมูลฝึกสอนจำนวน 450 กรณี ซึ่งเป็นชุดเดียวกับการทดสอบในหัวข้อ 7.1 ส่วนข้อมูลตรวจสอบจะใช้ข้อมูลตรวจสอบจำนวน 144 กรณี โดยมีกรณีที่ ATC มีค่า 0 รวมอยู่ด้วย ทั้งนี้ข้อมูลทั้งหมดเกิดจากการนำกรณีโหลดและกำลังการผลิตพื้นฐาน 6 กรณีมาเปลี่ยนแปลงระดับโหลดจากน้อยไปมากแล้วคำนวณค่า ATC

7.3.3 การสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ

กำหนดขาเข้าของ ANFIS ให้มีจำนวนฟuzzyเซตขาเข้าละ 3 เซต และสร้าง ANFIS ด้วยข้อมูลฝึกสอนด้วย Fuzzy Logic Toolbox ข้อมูลของ ANFIS แต่ละชุดแสดงดังตาราง

ตารางที่ 7.7 ANFIS ที่ใช้การทดสอบผลของชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่อการคำนวณ ATC

ANFIS	จำนวน ขาเข้า	จำนวน ขาออก	ฟังก์ชันความ เป็นสมาชิก	จำนวน พีชคณิต	จำนวนกฎ	จำนวน พารามิเตอร์
ANFIS1	5	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3 3	243	1503
ANFIS2	5	1	สี่เหลี่ยมคางหมู	3 3 3 3 3	243	1518
ANFIS3	5	1	ระฆัง	3 3 3 3 3	243	1503
ANFIS4	5	1	เกาส์เซียน	3 3 3 3 3	243	1488

หลังจากที่ได้ ANFIS ทั้ง 4 ชุดแล้วจึงนำข้อมูลฝึกสอนที่เตรียมไว้ไปฝึกสอน ANFIS ด้วย Fuzzy Logic Toolbox โดยฝึกสอนแบบไฮบริดจำนวน 10 รอบ ค่า RMSE ที่ได้ในแต่ละรอบแสดงในตาราง

ตารางที่ 7.8 ค่า RMSE จากการฝึกสอนแต่ละรอบในการทดสอบหัวข้อที่ 7.3

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANFIS1	0.627	0.619	0.617	0.611	0.607	0.606	0.605	0.605	0.605	0.606
ANFIS2	0.796	0.795	0.793	0.792	0.790	0.789	0.787	0.786	0.784	0.782
ANFIS3	0.799	0.798	0.797	0.796	0.795	0.794	0.792	0.791	0.790	0.788
ANFIS4	0.834	0.833	0.832	0.831	0.830	0.829	0.828	0.827	0.826	0.825

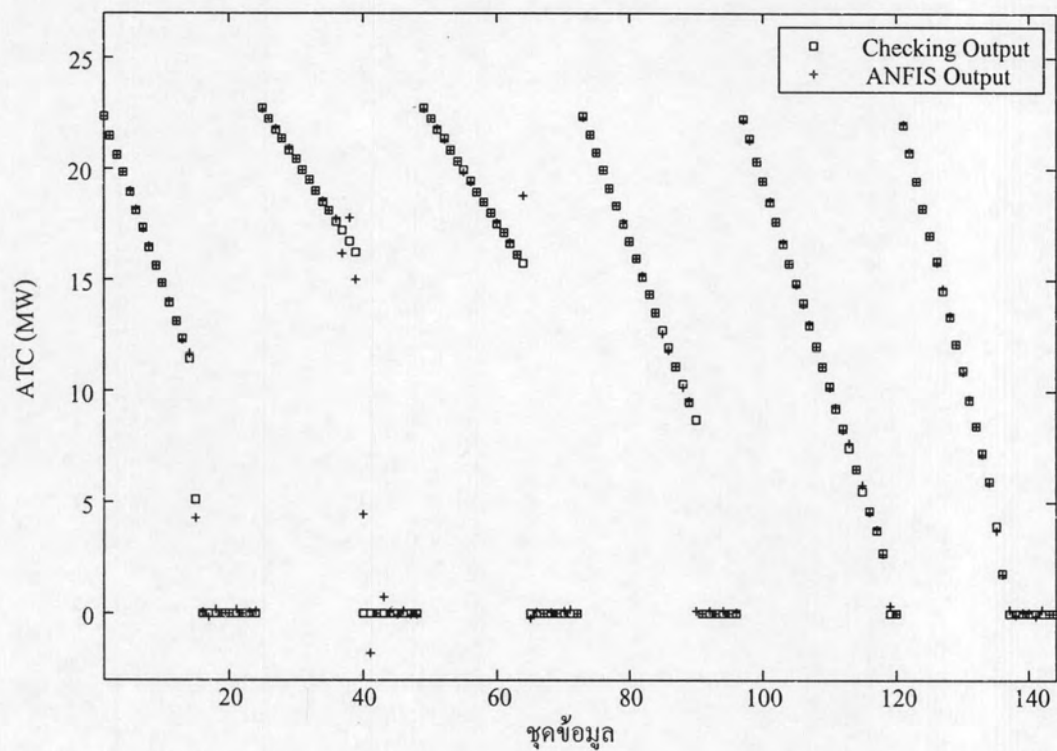
ในการนำ ANFIS ไปใช้งานจะเลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนและให้ค่า RMSE น้อยที่สุด ดังนั้นรูปแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 เลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอน 9, 10, 10 และ 10 รอบตามลำดับ

7.3.4 การตรวจสอบค่า ATC ขาออกจาก ANFIS

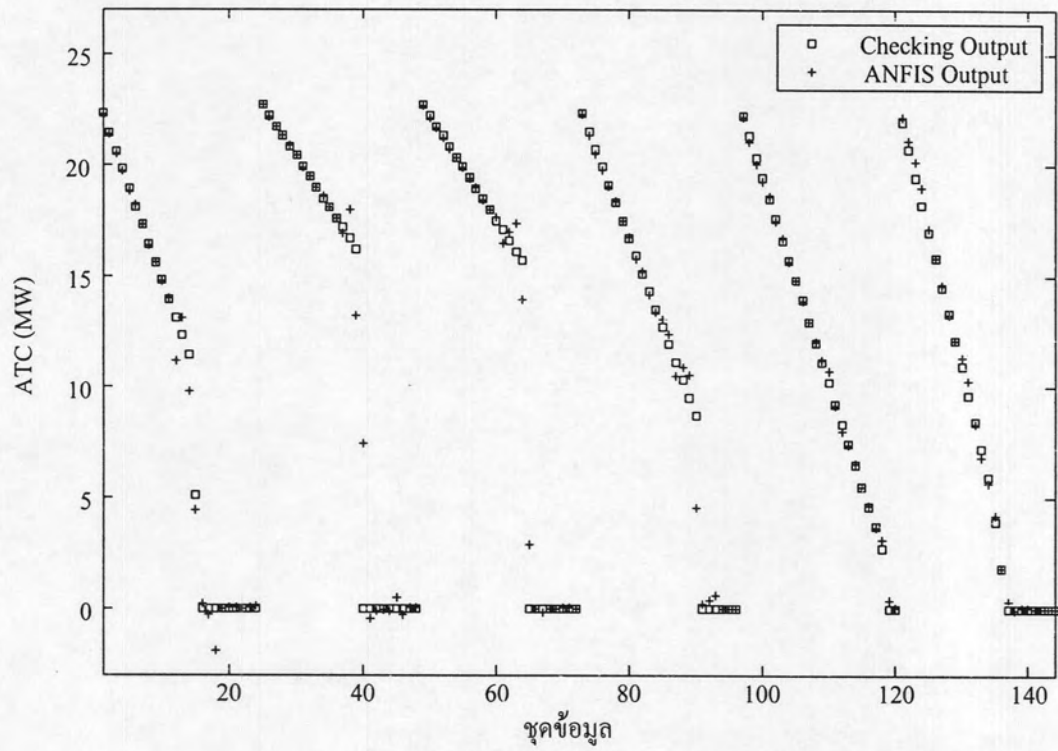
เมื่อได้โครงสร้าง ANFIS ทั้ง 4 รูปแบบจึงทดสอบ ANFIS ด้วยข้อมูลตรวจสอบที่เตรียมไว้ ค่า ATC ขาออกที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ คำนวณหา MAE , AE_{max} , AE_{min} , OE_{max} และ UE_{max} ด้วย 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 และ 7.19 ตามลำดับ

7.3.5 ผลการทดสอบ

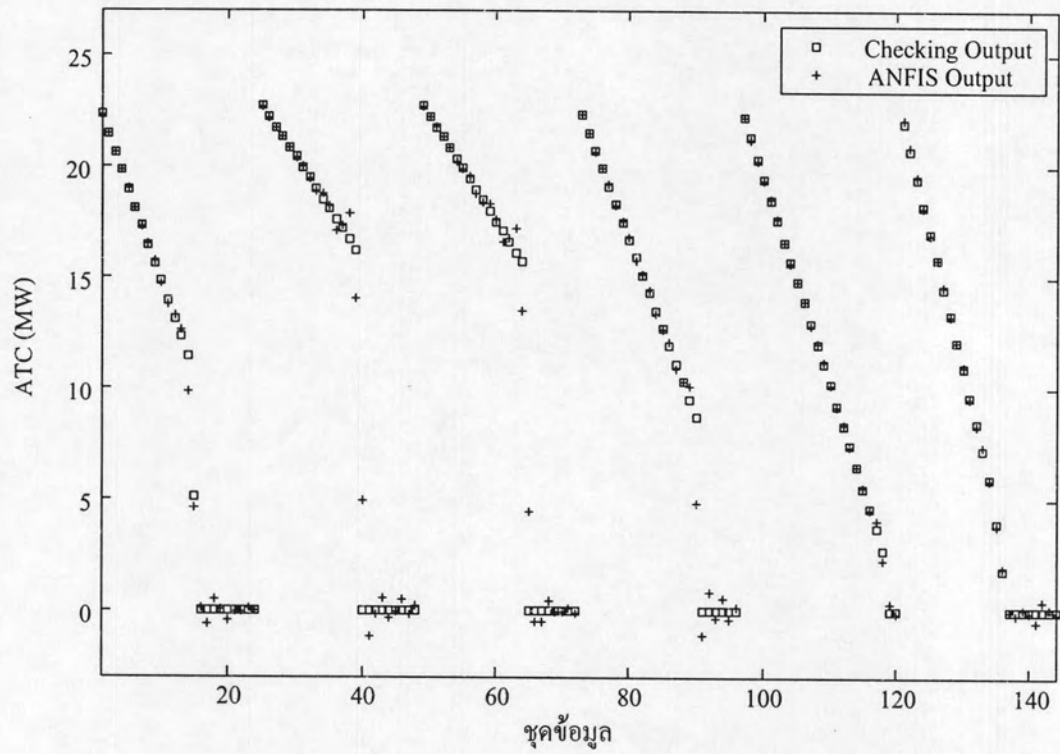
นำข้อมูลตรวจสอบป้อนให้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนเรียบร้อยแล้ว 4 ชุด ค่า ATC ที่ได้เทียบกับค่า ATC จากข้อมูลตรวจสอบแสดงได้ดังรูป



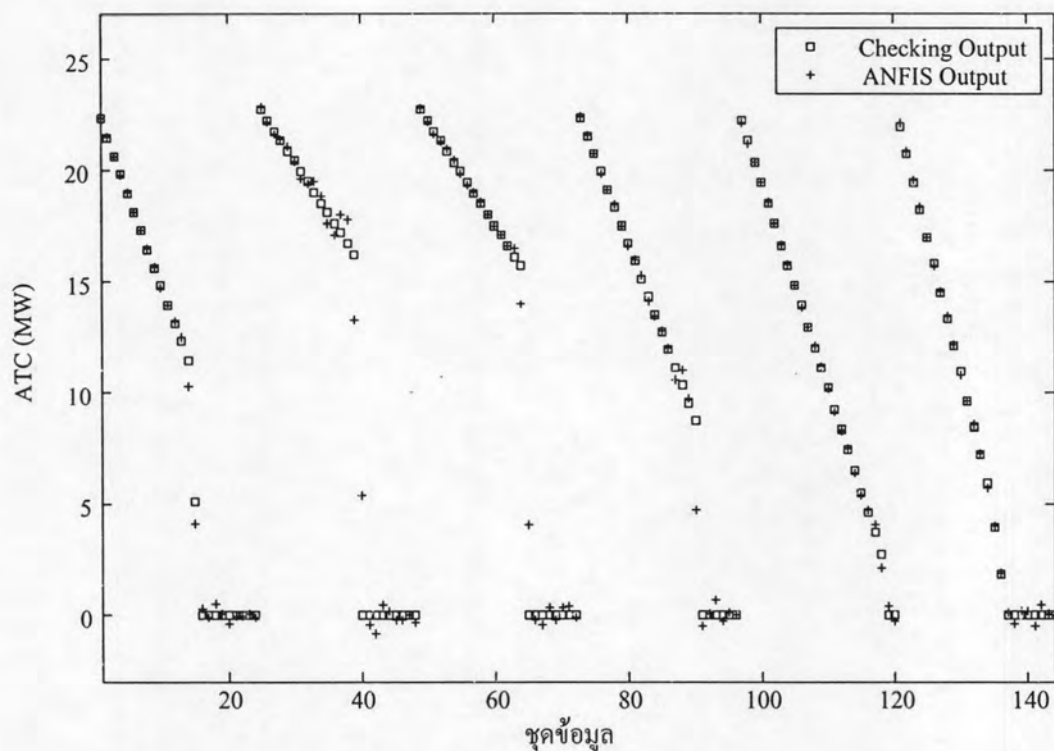
รูปที่ 7.20 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกขาเข้ารูปสามเหลี่ยม เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.21 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกขาเข้ารูปสี่เหลี่ยมคางหมู เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.22 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกขาเข้ารูปประจันg เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.23 ค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกขาแบบเกาส์เซียน เทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ

นำค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS มาวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนตามดัชนีต่างๆ ที่กำหนดไว้ ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบหัวข้อที่ 7.3

	สามเหลี่ยม	กางหมู	ระฆัง	เกาส์เซียน
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	1411.30	1409.00	1402.30	1416.80
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.02	0.02	0.02	0.02
MAE (MW)	0.2035	0.3322	0.3045	0.3044
AE_{max} (MW)	8.60	7.41	4.94	5.39
AE_{min} (MW)	0.000277	0.001251	0.000383	0.004440
OE_{max} (MW)	4.41	7.41	4.94	5.39
UE_{max} (MW)	-8.60	-4.19	-3.91	-3.98

7.3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อป้อนข้อมูลตรวจสอบให้กับ ANFIS ทุกชุด ผลปรากฏว่า ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมให้ค่า ATC ทั้งค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด อย่างไรก็ตามค่า MAE ที่ได้จาก ANFIS ชุดนี้มีค่าน้อยที่สุด และยังให้ค่า OE_{max} น้อยที่สุดเช่นกัน

ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ให้ค่า ATC ที่มีค่า MAE และ OE_{max} มากที่สุด ในขณะที่ ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปประฆังและเกาส์เซียนนั้น ให้ค่า MAE ใกล้เคียงกันคือ 0.3045 และ 0.3044 MW ตามลำดับ แต่ ANFIS ที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนจะให้ค่า AE_{min} มากที่สุด

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนพบว่า ANFIS ทั้ง 4 ชุดใช้เวลาในการฝึกสอนใกล้เคียงกัน เนื่องจาก ANFIS ทั้งหมดใช้รูปแบบขาเข้าเดียวกัน กำหนดจำนวนฟังก์ชันในแต่ละขาเข้าเท่ากัน ทำให้จำนวนกฎมีจำนวนเท่ากัน ถึงแม้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ขาเข้าต่างกัน แต่จำนวนพารามิเตอร์โดยรวมยังคงใกล้เคียงกัน

7.3.7 สรุปผลการทดสอบ

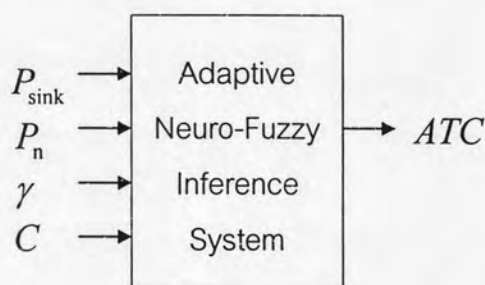
ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่แตกต่างกันของขาเข้า ANFIS ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่า ATC หากจะพิจารณาว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบใดเหมาะสมกับการใช้คำนวณ ATC ตามรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอ พบว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมมีความเหมาะสม เนื่องจากให้ค่า MAE น้อยกว่า ANFIS แบบอื่น และยังให้ค่า OE_{max} ที่มีค่าน้อยที่สุด แม้ว่า UE_{max} จะมีค่าด้านลบมากที่สุด แต่ในการคำนวณค่า ATC การคำนวณได้ค่ามากกว่าความเป็นจริงจะส่งผลเสียมากกว่าการคำนวณได้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

7.4 การทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย

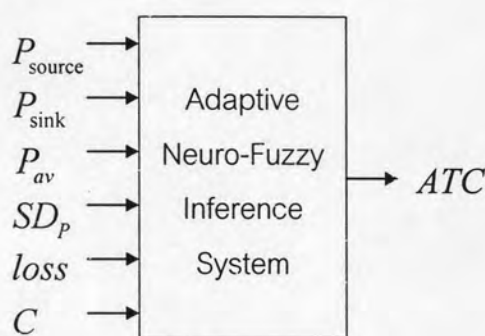
จากที่ได้มีการนำเสนอวิธีการคำนวณ ATC ด้วย ANFIS และทำการทดสอบบนระบบทดสอบ 30 บัสเรียบร้อยแล้ว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนของ ATC ที่คำนวณด้วย ANFIS ให้ดีขึ้นจากวิธีการที่เคยมีการนำเสนอไว้ อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้จะทดสอบการคำนวณค่า ATC ด้วย ANFIS โดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณอีกครั้งและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน

7.4.1 รูปแบบขาเข้าที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบนี้ใช้ขาเข้าของ ANFIS แบบเก่า และขาเข้าแบบที่นำเสนอ โดยกำหนดให้มีดัชนีสถานะ (category index, C) รวมอยู่ด้วยดังรูป



รูปที่ 7.24 ขาเข้ารูปแบบเก่า



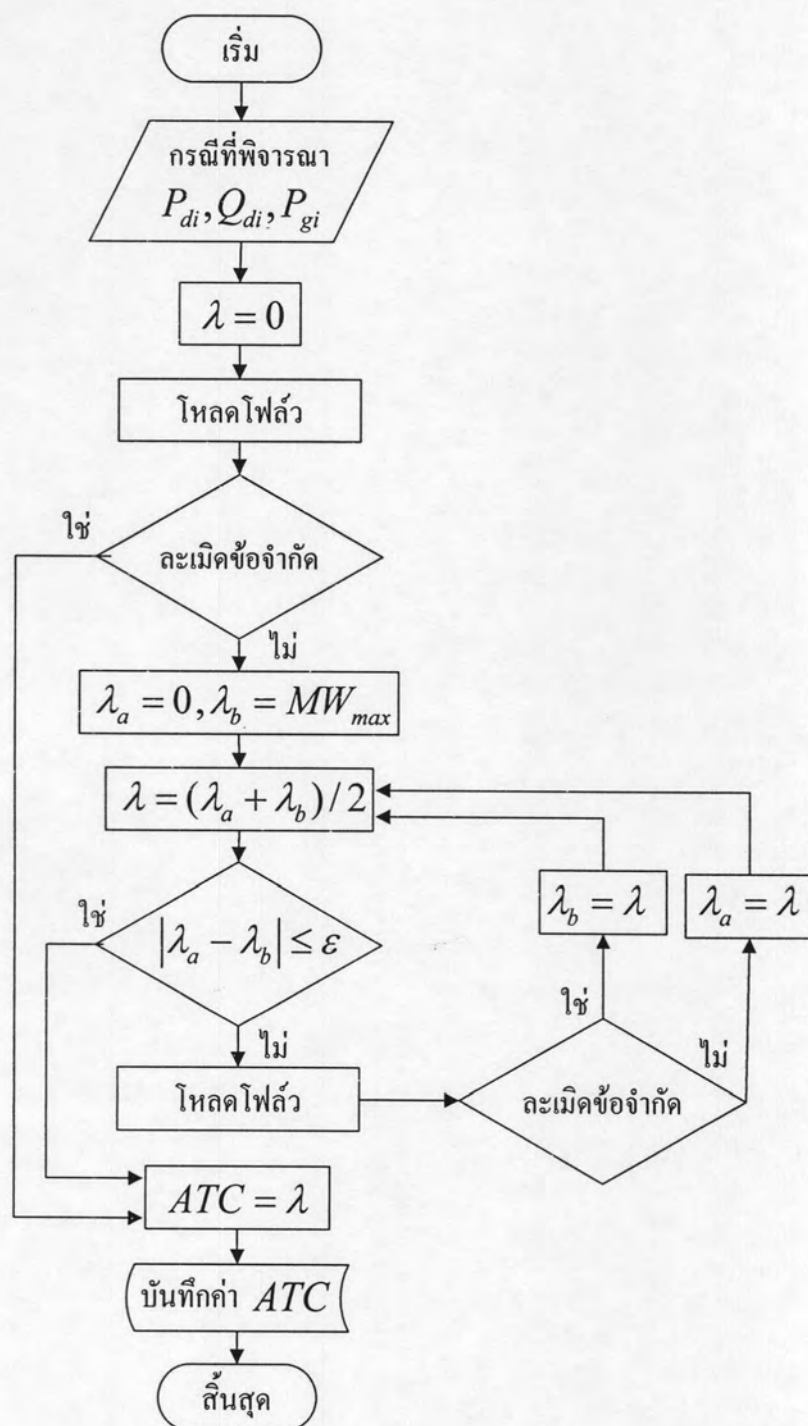
รูปที่ 7.25 รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอ

7.4.2 ระบบที่ใช้ทดสอบและการสร้างข้อมูลตัวอย่าง

ใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย โดยมีข้อมูลตัวอย่างเป็นโหลด 2 กรณีคือ ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (peak load) และกรณีความต้องการไฟฟ้าต่ำสุด (light load) จากข้อมูลโหลด 2 กรณี จึงสร้างกรณีโหลดพื้นฐานที่แตกต่างเพิ่มอีกอย่างละ 6 กรณีที่ไม่ละเมิดขีดจำกัดของระบบ จะได้จำนวนกรณีโหลดรวมเป็น 12 กรณี และใช้ 12 กรณีนี้เป็นพื้นฐานในการสร้างข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลตรวจสอบสำหรับ ANFIS ต่อไป

การคำนวณค่า ATC ในการทดสอบนี้ พิจารณาระบบจำนวน 2 คู่คือ ATC ระหว่างบัส RB3 500kV (71923) ไปยังบัส HY2 115 kV (31709) และ ATC ระหว่างบัส MM3 500kV (41933) ไปยังบัส KK1 115kV (21718) คำนวณค่า ATC ด้วยวิธี RPF แต่เนื่องจากระบบมีขนาดใหญ่จึงได้

ปรับปรุงวิธี RPF เดิม โดยการใช้วิธี bisection ช่วยในการหาค่าตอบให้รวดเร็วขึ้น ขั้นตอนในการคำนวณ ATC แต่ละค่าแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 7.26 ขั้นตอนในการคำนวณค่า ATC ด้วยวิธี RPF ควบคู่กับวิธี bisection

สร้างข้อมูลตัวอย่างจากกรณีโหลดทั้ง 12 กรณี ด้วยการปรับระดับโหลดจากระดับที่น้อยกว่าระดับปกติของแต่ละกรณีไปยังระดับที่สูงกว่าระดับปกติของแต่ละกรณี คำนวณค่า ATC ของแต่ละกรณีเก็บไว้ สุดท้ายจะได้ข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด 1674 กรณี จากนั้นจึงแยกข้อมูลตัวอย่างเป็นข้อมูลฝึกสอนจำนวน 1123 กรณี และข้อมูลตรวจสอบ 551 กรณี

ปรับข้อมูลจากข้อมูลโหลดและกำลังการผลิตแต่ละกรณีไปเป็นข้อมูลตามขาเข้าที่จะป้อนให้แก่ ANFIS ทั้ง 2 รูปแบบ โดยขาเข้าที่นำเสนอคำนวณค่าขาเข้าแต่ละดังนี้

- 1.) คำนวณ $[P_{source}]_{irn}$ และ $[P_{source}]_{chk}$ ด้วย 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ
- 2.) คำนวณ $[P_{sink}]_{irn}$ และ $[P_{sink}]_{chk}$ ด้วย 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ
- 3.) คำนวณ $P_{av,k}$ และ $P_{av,l}$ ด้วย 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ
- 4.) คำนวณ $SD_{p,k}$ และ $SD_{p,l}$ ด้วย 7.7 และ 7.8 ตามลำดับ
- 5.) คำนวณ $loss_k$ และ $loss_l$ ด้วย 7.9 และ 7.10 ตามลำดับ

สำหรับขาเข้าแบบค้นหาเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์น้อยที่สุดด้วยวิธี dijkstra โดยคู่บัส RB3 ไปยัง HY2 ได้เส้นทางคือบัส RB3 500 kV (71923), RB3 230 kV (71823), RB2 (71821), HH (71807), PKK (71817), BSP1 (71803), SRT (31838), TS (31840), KNE (31814), HY2 230 kV และ HY2 115 kV โดยบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่และอยู่ใกล้บัสต้นทางมากที่สุดคือบัส RB3 230 kV (71823) จึงกำหนดบัสนี้เป็นบัสข้างเคียง (P_n)

สำหรับคู่บัส MM3 ไปยัง KK1 ได้เส้นทางคือ MM3 500kV (41933), TTK 500kV (41965), TTK 230kV (41865), CYP (21807), KK3 (21820), KK1 230 kV (21818) และ KK1 115kV (21718) โดยเส้นทางจากต้นทางไปยังปลายทางไม่มีบัสใดที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ จึงกำหนดให้บัสข้างเคียงคือ MM3 500kV (41933) ซึ่งเป็นบัสต้นทาง จากนั้นจึงคำนวณค่าขาเข้าในรูปแบบเท่าดังนี้

- 1.) คำนวณ $[P_{sink}]_{irn}$ และ $[P_{sink}]_{chk}$ ด้วย 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ
- 2.) คำนวณ $[P_n]_{irn}$ และ $[P_n]_{chk}$ ด้วย 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ
- 3.) คำนวณ γ_k และ γ_l ด้วย 7.13 และ 7.14 ตามลำดับ

ในการทดสอบนี้มีการใช้ดัชนีสถานะ (category index,C) เป็นตัวบ่งบอกสถานะของโหลดที่ป้อนเข้าสู่ ANFIS ซึ่งกำหนดให้ข้อมูลที่มาจากกรณีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (peak load) มีค่าดัชนีสถานะเป็น 1 ส่วนข้อมูลที่มาจากกรณีความต้องการไฟฟ้าต่ำสุด (light load) มีค่าดัชนีสถานะเป็น 2 เนื่องจากภาวะโหลดทั้ง 2 แบบมีจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานไม่เท่ากัน จากคำจำกัดความของดัชนีสถานะเดิม สถานะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องหรือสายส่งบางเส้นไม่ได้ใช้งานในระบบจะต้องกำหนดสถานะนั้นด้วยดัชนีสถานะเพื่อให้ ANFIS สามารถแยกแยะกรณีที่เกิดขึ้นได้

7.4.3 การสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบ

นำข้อมูลฝึกสอนที่ได้มาสร้าง ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบด้วย Fuzzy Logic Toolbox กำหนดให้ขาเข้ามีฟัซซีเซตรูปสามเหลี่ยมจำนวนขาเข้าละ 3 เซต ยกเว้นดัชนีสถานะกำหนดให้มีฟัซซีเซตจำนวน 2 เซต และกำหนดขาออกของกฎแต่ละกฎเป็นสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่หนึ่ง จะได้ ANFIS ที่ใช้ในการทดสอบดังตาราง

ตารางที่ 7.10 ANFIS ที่ใช้การทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย

ANFIS	จำนวนขาเข้า	จำนวนขาออก	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	จำนวนฟัซซีเซต	จำนวนกฎ	จำนวนพารามิเตอร์
ขาเข้าแบบเก่า	4	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 2	54	303
ขาเข้าที่นำเสนอ	6	1	สามเหลี่ยม	3 3 3 3 3 2	486	3453

หลังจากได้ ANFIS แต่ละชุด จึงฝึกสอน ANFIS ด้วยข้อมูลฝึกสอนที่เตรียมไว้สำหรับ ANFIS แต่ละชุด ใช้ชุดคำสั่ง Fuzzy Logic Toolbox โดยฝึกสอนแบบไฮบริดจำนวน 10 รอบ ค่า RMSE ที่ได้จากรอบการฝึกสอนต่าง ๆ แสดงดังตาราง

ตารางที่ 7.11 ค่า RMSE จากการฝึกสอนแต่ละรอบเพื่อคำนวณค่า ATC จากบัส RB3 ไปยังบัส HY2

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ขาเข้าแบบเก่า	8.814	8.792	8.790	8.789	8.789	8.787	8.782	8.779	8.766	8.751
ขาเข้าที่นำเสนอ	5.562	5.560	5.562	5.549	5.554	5.547	5.471	5.502	5.475	5.471

ตารางที่ 7.12 ค่า RMSE จากการฝึกสอนแต่ละรอบเพื่อคำนวณค่า ATC จากบัส MM3 ไปยังบัส KK1

รอบที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ขาเข้าแบบเก่า	10.45	10.45	10.50	10.45	10.51	10.46	10.50	10.47	10.45	10.50
ขาเข้าที่นำเสนอ	6.262	6.261	6.259	6.262	6.256	6.257	6.259	6.260	6.268	6.270

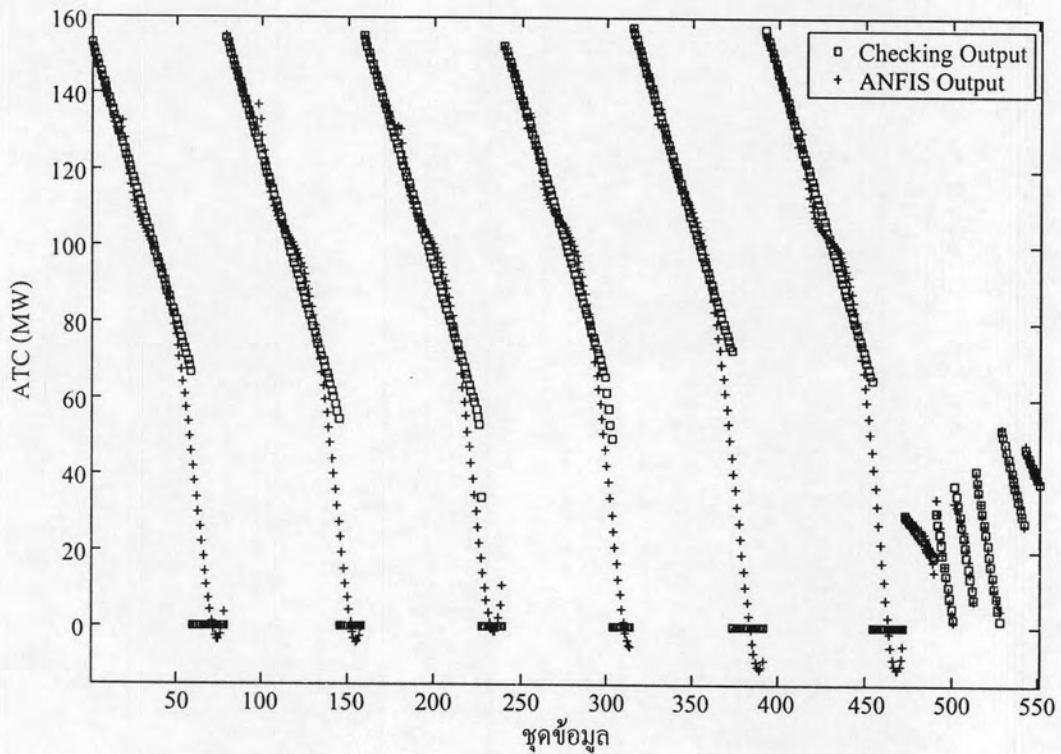
ในการนำ ANFIS ไปใช้งานจะเลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนและให้ค่า RMSE น้อยที่สุด สำหรับ ANFIS ที่ใช้คำนวณค่า ATC ระหว่างบัส RB3 ไปยังบัส HY2 เลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนในรอบที่ 10 ทั้งขาเข้ารูปแบบเก่าและรูปแบบที่นำเสนอ สำหรับ ANFIS ที่ใช้คำนวณค่า ATC ระหว่างบัส MM3 ไปยังบัส KK1 เลือกใช้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอน 9 รอบและ 5 รอบ สำหรับ ANFIS ที่ใช้ขาเข้าแบบเก่าและขาเข้าที่นำเสนอตามลำดับ

7.4.4 การตรวจสอบค่า ATC ขาออกจาก ANFIS

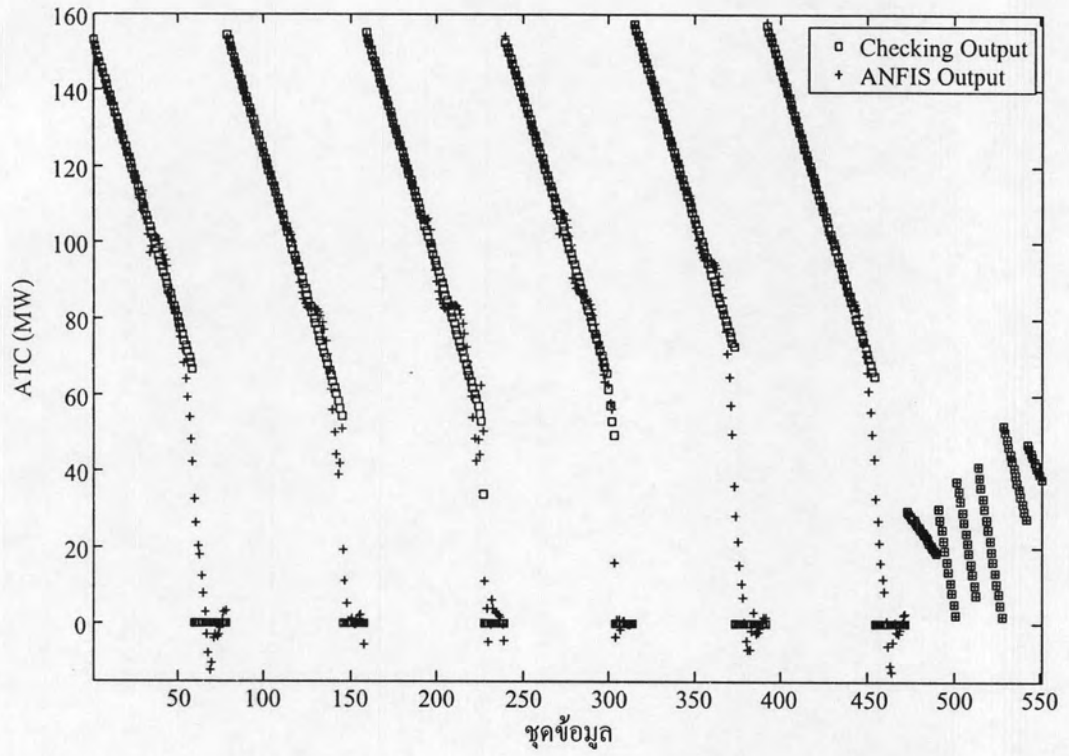
เมื่อได้โครงสร้าง ANFIS ทั้ง 4 ชุดจึงทดสอบ ANFIS ด้วยข้อมูลตรวจสอบที่เตรียมไว้ ค่า ATC ขาออกที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบ คำนวณหา MAE , AE_{max} , AE_{min} , OE_{max} และ UE_{max} ด้วย 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 และ 7.19 ตามลำดับ

7.4.5 ผลการทดสอบ

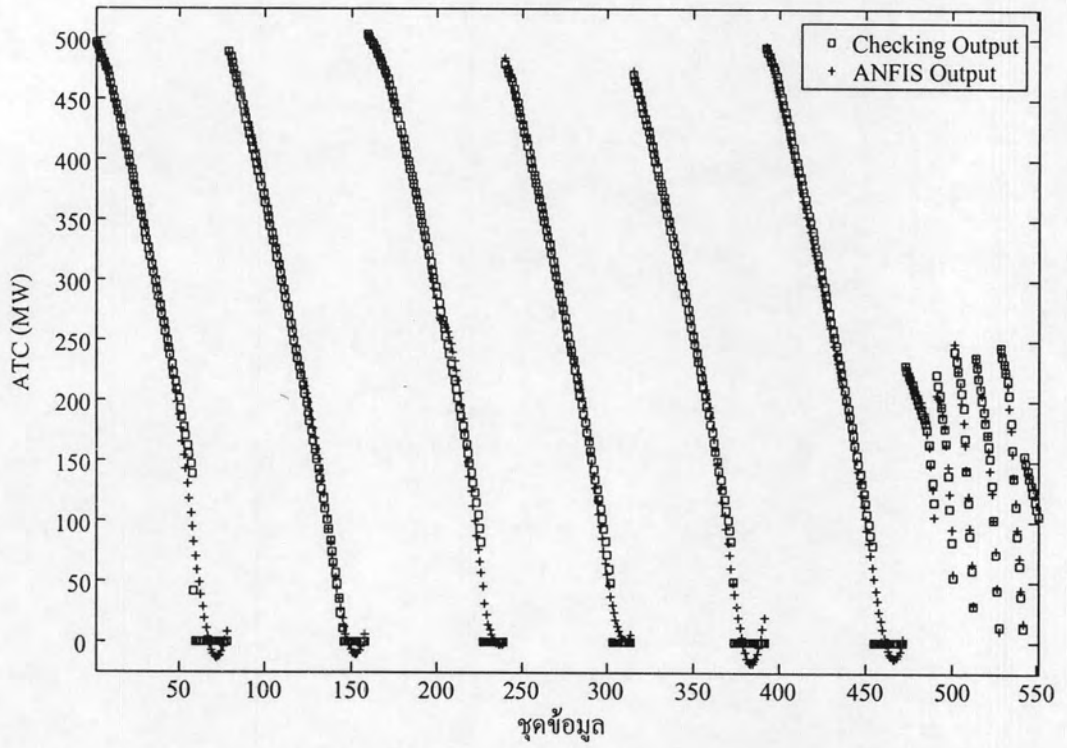
นำข้อมูลตรวจสอบป้อนให้ ANFIS ที่ผ่านการฝึกสอนทั้ง 2 ชุด ค่า ATC ที่ได้เทียบกับค่า ATC จากข้อมูลตรวจสอบแสดงได้ดังรูป



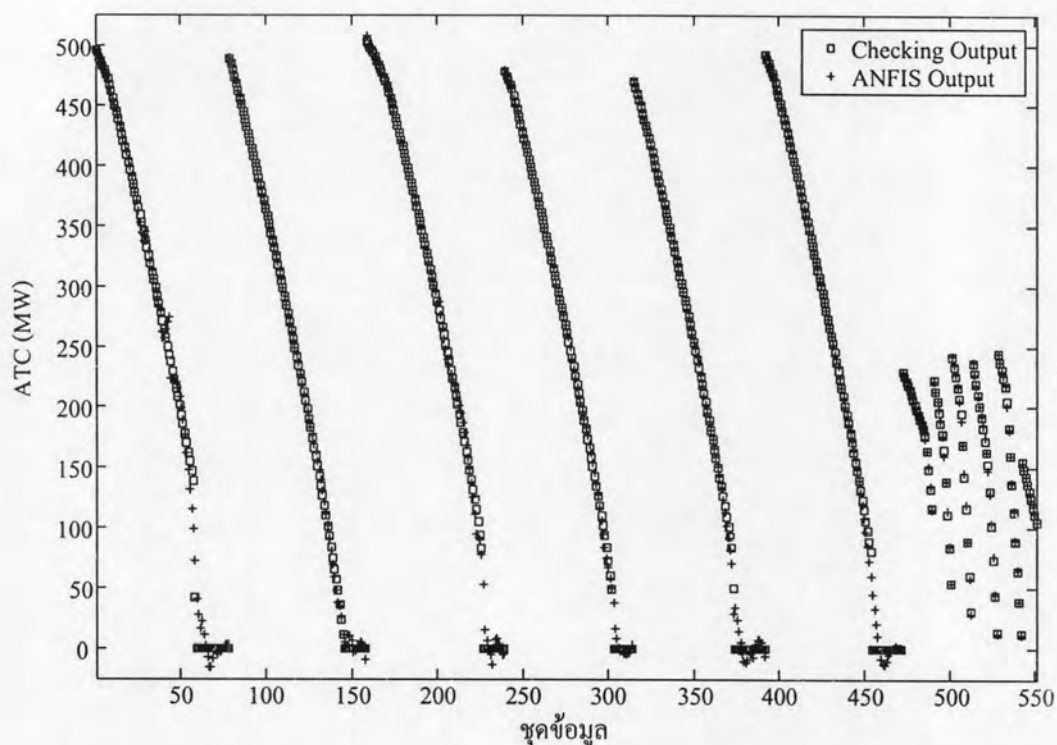
รูปที่ 7.27 ค่า ATC ระหว่างบัส RB3 ไปยัง HY2 ซึ่งได้จาก ANFIS ที่ใช้รูปแบบขาเข้าแบบเก่า เทียบกับ ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.28 ค่า ATC ระหว่างบัส RB3 ไปยัง HY2 ซึ่งได้จาก ANFIS ที่ใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอ
เทียบกับ ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.29 ค่า ATC ระหว่างบัส MM3 ไปยัง KK1 ซึ่งได้จาก ANFIS ที่ใช้รูปแบบขาเข้าแบบเก่า เทียบกับ ATC ในข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 7.30 ค่า ATC ระหว่างบัส MM3 ไปยัง KK1 ซึ่งได้จาก ANFIS ที่ใช้รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอ เทียบกับ ATC ในข้อมูลตรวจสอบ

จากนั้นนำค่า ATC ที่ได้จาก ANFIS มาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตามดัชนีต่างๆ ที่กำหนดไว้ ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.13 ผลการทดสอบคำนวณค่า ATC ด้วย ANFIS กับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย

ATC ระหว่างบัส	RB3-HY2		MM3-KK1	
	ขาเข้า แบบเก่า	ขาเข้า ที่นำเสนอ	ขาเข้า แบบเก่า	ขาเข้า ที่นำเสนอ
เวลาในการฝึกสอน (วินาที)	95.31	19080.00	91.14	19133.00
เวลาในการคำนวณ (วินาที)	0.05	0.09	0.05	0.11
MAE (MW)	5.03	2.72	6.32	3.33
AE_{max} (MW)	41.92	36.70	70.66	52.94
AE_{min} (MW)	0.00366	0.00002	0.0044	0.0106
OE_{max} (MW)	41.92	32.93	70.66	52.94
UE_{max} (MW)	-30.97	-36.70	-44.05	-39.63

7.4.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณาการคำนวณ ATC ระหว่างบัส RB3 ไปยังบัส HY2 พบว่า ANFIS ในรูปแบบขาเข้าที่นำเสนอให้ค่า AE_{max} , AE_{min} และ OE_{max} น้อยกว่า ANFIS ที่ใช้ขาเข้ารูปแบบเก่า แต่สำหรับค่า UE_{max} ขาเข้ารูปแบบที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า และเมื่อพิจารณาการคำนวณ ATC ระหว่างบัส MM3 ไปยังบัส KK1 พบว่าให้ค่า AE_{max} , OE_{max} และ UE_{max} ดีกว่า ANFIS ที่ใช้รูปแบบขาเข้าแบบเก่า แต่ขาเข้าที่นำเสนอให้ค่า AE_{min} มากกว่าขาเข้าแบบเก่า อย่างไรก็ตามผลการทดสอบพบว่า ANFIS ในรูปแบบที่นำเสนอสามารถคำนวณค่า ATC และให้ค่า MAE ที่มีค่าน้อยกว่า ANFIS รูปแบบเก่า ซึ่งผลการทดสอบการคำนวณค่า ATC จากบัสทั้ง 2 คู่ก็ให้ผลสอดคล้องกัน

ดัชนี AE_{max} , OE_{max} และ UE_{max} เป็นดัชนีที่บ่งบอกกรณีที่ค่า ATC ที่คำนวณจาก ANFIS มีความแตกต่างจากค่า ATC ทดสอบมากที่สุด จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีเหล่านี้ที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละจุดพบว่า ในกรณีตัวอย่างนั้นค่า ATC มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มระดับโหลดในระบบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากจะเกิดขึ้นในสถานะที่ค่า ATC มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่า 0 MW อย่างไรก็ตามในการทดสอบนี้ใช้วิธีการปรับค่าแรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน (PV bus) พร้อมกันทั้งระบบเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แต่ในการทำงานจริงวิธีปรับแรงดันจะแตกต่างจากการสร้างข้อมูลในการทดสอบนี้ โดยค่าแรงดันที่บัสโหลด (PQ bus) แต่ละบัสจะถูกควบคุมจาก Switched Shunt ซึ่งจะมีการปรับแรงดันเป็นรายบัส ดังนั้นหากระบบจะเข้าสู่สถานะละเมิดขีดจำกัด ก็ยังสามารถปรับแรงดันเป็นรายบัสได้ ค่า ATC จะไม่เปลี่ยนเป็น 0 ทันทีทันใดดังเช่นข้อมูลตรวจสอบ

7.4.5 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในหัวข้อนี้ได้ใช้ขาเข้าที่นำเสนอ โดยใช้งานตัวแปรขาเข้าทุกตัวรวมทั้งดัชนีสถานะ โดยในที่นี้ใช้เพื่อแยกสถานะที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้งานในระบบแตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบขาเข้าของ ANFIS ที่นำเสนอ สามารถคำนวณ ATC ได้ผลความคลาดเคลื่อนที่ดีกว่ารูปแบบขาเข้าแบบเก่า

7.5 สรุป

จากการทดสอบทั้งหมดในบทนี้แสดงให้เห็นว่า การกำหนดค่าเข้าของ ANFIS เพื่อคำนวณค่า ATC ตามแนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถคำนวณค่า ATC ได้ใกล้เคียงกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบซึ่งคำนวณมาจากวิธี RPF รวมทั้งกรณีที่ระบบมี TCSC ติดตั้งอยู่ รูปแบบขาเข้าที่นำเสนอก็สามารถทำให้ ANFIS แยกแยะสถานะของระบบได้และให้ค่า ATC ขาออกได้ใกล้เคียงกับค่า ATC ในข้อมูลตรวจสอบเช่นกัน โดยฟuzzyเซตที่เหมาะสมในการคำนวณ ATC ด้วย ANFIS ก็คือฟuzzyเซตที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม นอกจากนี้เมื่อเทียบผลการคำนวณกับขาเข้ารูปแบบเก่า พบว่าขาเข้ารูปแบบที่นำเสนอให้ค่า ATC ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า

ในการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย การสร้างข้อมูลตัวอย่างพบว่าสถานะความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (peak load) และสถานะความต้องการไฟฟ้าต่ำสุด (light load) มีจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบแตกต่างกัน ในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าต่ำสุดที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางบัสอาจไม่ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ค่า ATC ที่ได้จากสถานะโหลดทั้ง 2 สถานะ มีความไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นดัชนีสถานะจึงเป็นตัวแปรขาเข้าที่สำคัญทำให้ ANFIS สามารถแยกแยะสถานะเหล่านี้ได้และจะนำไปสู่ข้อเสนอแนะในลำดับต่อไป