เอกสารสรุปวิชาโครงงาน

ชื่องานโครงงาน

กรอบการทำงานสำหรับการสลับโหมด Grid-Following/Grid-Forming แบบอัตโนมัติของ Inverter-Based Resources

An Automatic Following/Forming Framework for Inverter-Based Resources

สมาชิกผู้จัดทำ

1. พิชิตชัย เจือจันทร์ 66010569
2. ภัคพล ผดุงแดน 66010612

อาจารย์ที่ปรึกษา

1. ดร. ทศพร สุรินทร์แก้ว
2. ศาสตราจารย์. ดร. อิสระชัย งามหรู

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2569

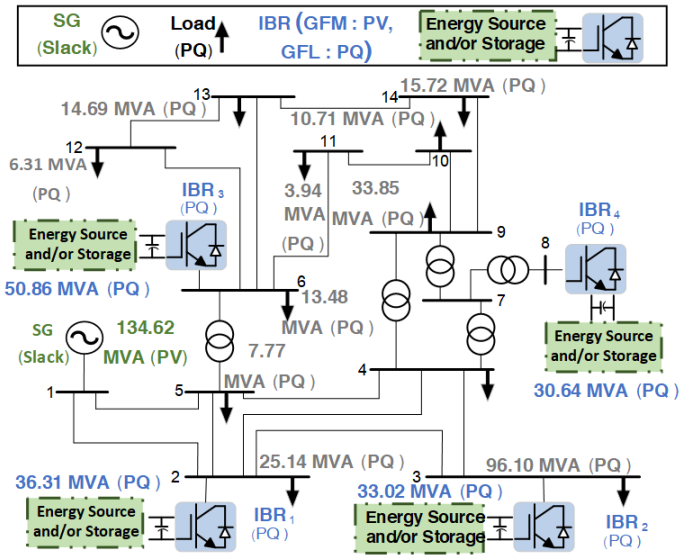
วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ศึกษาและพัฒนาสายงานคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมโยงการไหลของกำลัง (Power Flow: PF) การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (Small-Signal Stability Analysis: SSSA) และการจำลองโดเมนเวลา (Time-Domain Simulation: TS) ภายใต้แบบจำลองเดียวกัน
2. พัฒนาแบบจำลองทรัพยากรที่เชื่อมต่อผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter-Based Resources: IBR) ที่สามารถทำงานได้ทั้งโหมด Grid-Following (GFL) และ Grid-Forming (GFM)
3. พัฒนากลไก supervisor สำหรับสลับโหมด GFL/GFM อัตโนมัติตามสภาวะของระบบ โดยรักษาความต่อเนื่องของ state และกระแสที่จุดเชื่อมต่อ
4. ทดสอบกรอบการทำงานบนระบบ IEEE 14-bus ภายใต้เหตุการณ์รบกวนหลายชนิด และเปรียบเทียบผลกับนโยบายการควบคุมแบบอื่น

ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงงาน

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีสัดส่วนแหล่งพลังงานที่เชื่อมต่อผ่านอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน อุปกรณ์เหล่านี้มีพฤติกรรมแตกต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator: SG) ซึ่งเดิมเป็นแหล่งกำหนดแรงดัน ความถี่ และมุมอ้างอิงให้กับโครงข่าย

IBR แบบ GFL ทำงานโดยอาศัยแรงดันของโครงข่ายเป็นสัญญาณอ้างอิงผ่านวงจร Phase-Locked Loop (PLL) จึงเหมาะกับระบบที่มีแหล่งสร้างกริดอยู่แล้ว ในทางตรงกันข้าม GFM สามารถสร้างมุมและแรงดันอ้างอิงของตนเองได้ และจึงมีบทบาทสำคัญเมื่อระบบสูญเสีย SG หรือเข้าสู่สภาวะกริดอ่อน [11] อย่างไรก็ตาม การกำหนดให้ IBR ทุกตัวทำงานเป็น GFM ตลอดเวลาไม่จำเป็นต้องให้ผลดีที่สุด งานที่เปรียบเทียบสองโหมดในฐานะบริการของระบบชี้ว่าโหมดที่เหมาะสมขึ้นกับสภาวะการทำงาน [15] และงานที่เสนอตัวควบคุมสลับโหมดได้แสดงว่าการเปลี่ยนโหมดต้องรักษาความต่อเนื่องของ state ไว้ [16] ส่วนพฤติกรรมทรานเชียนต์ของกลยุทธ์ self-synchronisation ใน GFM ก็ขึ้นกับจุดทำงานอย่างมาก [13] การกำหนดโหมดตายตัวจึงอาจเพิ่มความซับซ้อนของการควบคุมหรือทำให้การจำลองไม่ผ่านในบางสภาวะ โครงงานนี้จึงเสนอกรอบการทำงานที่ให้ IBR เปลี่ยนบทบาทระหว่าง GFL และ GFM ตามความจำเป็นของระบบ โดยใช้ผลจาก PF, equilibrium, SSSA และสถานะที่ยอมรับแล้วจาก TS เป็นพื้นฐานในการตัดสินใจ การทดสอบหลักใช้ระบบ IEEE 14-bus ซึ่งประกอบด้วย SG ที่บัส 1 และ IBR จำนวน 4 ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบ IEEE 14-bus ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา โดยมี SG และ IBR แบบ GFL/GFM

กรณีศึกษาถูกออกแบบให้เกิดการสูญเสีย SG การเปลี่ยนโหลด fault การปลดสายส่ง และการคืน SG เพื่อให้เห็นความจำเป็นของการเปลี่ยนบทบาทของ IBR อย่างชัดเจน หากไม่มีแหล่ง voltage-forming หลัง SG ถูกปลด ระบบจะไม่มีผู้ถือมุมอ้างอิงและตัวแก้สมการจะต้องหยุดแบบ fail-closed แทนการบังคับให้ผลลัพธ์ผ่าน

การดำเนินงานและผลงานที่ได้รับจากโครงงาน (โดยสังเขป) พร้อมภาพประกอบ

1. ขอบเขตของงาน ที่มาของข้อมูล และการจำแนกชั้นข้อมูล

ระบบที่ศึกษาคือเครือข่าย IEEE 14-bus ที่มี SG หนึ่งเครื่องที่บัสอ้างอิงและ IBR สี่ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 ทั้งระบบถูกประกอบเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์–พีชคณิต (differential–algebraic equations: DAE) ชุดเดียว ที่บังคับกฎกระแสของ Kirchhoff (KCL) ที่ทุกบัส ไม่มีการยุบบัสใดทิ้ง ไม่มีการแทนอุปกรณ์ด้วยแหล่งจ่ายอุดมคติ และไม่มีการแยกแก้ทีละอุปกรณ์ ฐานที่ใช้ตลอดรายงานคือ $S_{\text{base}} = 100$ MVA และความถี่ฐาน $f_0 = 60$ Hz

ที่มาของข้อมูลนำเข้า ข้อมูลเครือข่าย พิกัดสายส่ง หม้อแปลงที่มีแท็ป และตารางโหลดใช้กรณีทดสอบ IEEE 14-bus ในรูปแบบ IEEE Common Data Format ตามที่เผยแพร่ในชุด MATPOWER [6] พลวัตของ SG ใช้ค่าจากรายงานทางเทคนิคของ Kodsi และ Cañizares [5] โดยแปลงฐานจากฐานเครื่องมาเป็นฐานระบบ ส่วนโครงสร้างของ IBR สองโหมดประกอบขึ้นจากบล็อกมาตรฐานในเอกสารอ้างอิง คือวงควบคุมกระแสและ PLL ตาม Yazdani และ Iravani [8] กับ Teodorescu และคณะ [9] วงกำลังชั้นนอกตาม Bacha และคณะ [10] และเครื่องซิงโครนัสเสมือนแบบไม่มี PLL ตาม Sakimoto และคณะ [12] ส่วนค่าเกนและพารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ในกรณีศึกษานี้เป็นชั้น **กำหนดโดยกรณีศึกษา** ซึ่งตรึงไว้ก่อนดูผลทุกตัว

การจำแนกชั้นของการตัดสินใจ สมการฝั่ง AC และฟลักซ์ของ SG กับสมการฝั่ง AC และตัวควบคุมของ IBR เป็นชั้น **ถอดจากแหล่งอ้างอิง** (source-mapped) คือถอดจากแหล่งอ้างอิงที่ระบุไว้ข้างต้น ส่วนเวกเตอร์ state รวม 17 ตัวของ IBR แผนที่ถ่ายโอน GFL↔GFM และการปิดสมการของแหล่งจ่าย DC เป็นชั้น **โครงงานอนุมานเอง** (project-derived) คือโครงงานอนุมานขึ้นเองพร้อมประกาศที่มา พารามิเตอร์ของเครื่องและคอนเวอร์เตอร์ ฐานต่อหน่วย และเวลาเหตุการณ์เป็นชั้น **กำหนดโดยกรณีศึกษา** (case-defined) คือกำหนดไว้ล่วงหน้าก่อนดูผล ส่วนตัวทำนายขั้นเวลา นโยบายการแบ่งขั้นเวลาย่อย และเกณฑ์ควบคุมความคลาดเคลื่อนเป็นชั้น **วิธีเชิงตัวเลข** (numerical-method) ความสำคัญของการแยกชั้นนี้คือ ข้ออ้างเชิงกายภาพต้องพิงชั้นที่ถอดจากแหล่งอ้างอิงหรือชั้นที่กรณีศึกษากำหนดเท่านั้น สมมติฐานเชิงวินิจฉัยไม่สามารถใช้สนับสนุนข้อสรุปเรื่องความพร้อมใช้งานได้

ที่มาของรูปผลลัพธ์ รูปทุกรูปวาดจากวิถีที่ตัวแก้สมการยอมรับแล้วของการรัน 160 วินาที ชุดเดียวกับที่ตารางอ้างถึง เส้นผลการจำลองเป็นค่าดิบ ไม่มีการทำให้เรียบ กรอง ลดจำนวนจุด หรือแทรกค่า และทุกแผงเป็นเส้นล้วน ไม่ระบายพื้นที่ใต้เส้น

1.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ตลอดรายงาน

ตารางที่ 1 รวบรวมสัญลักษณ์หลักไว้ที่เดียวเพื่อให้ผู้อ่านย้อนกลับมาดูได้โดยไม่ต้องค้นทั้งเล่ม

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์หลักที่ใช้ตลอดรายงาน

สัญลักษณ์	ความหมาย
Y_{net}, V	แอดมิตแตนซ์ของเครือข่าย และเวกเตอร์แรงดันบัสเชิงซ้อน
$I_{\text{bus}}(x, V)$	กระแสรวมที่อุปกรณ์ทุกตัวอัดเข้าบัส
x, y, u	differential state, algebraic variable, input และคำสั่ง

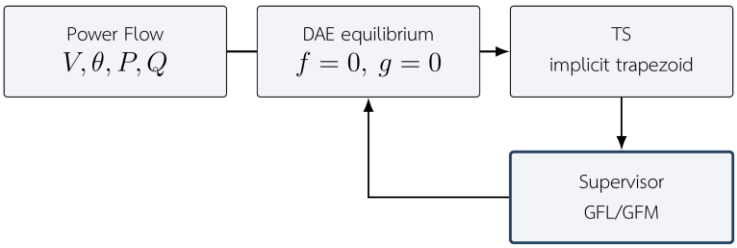
สัญลักษณ์	ความหมาย
$S_{\text{base}}, f_0, \omega_b$	ฐานกำลังระบบ, ความถี่ฐาน, $\omega_b = 2\pi f_0$
κ	อัตราส่วนฐาน $S_{\text{base}}/M_{\text{base}}$ ระหว่างฐานระบบกับฐานอุปกรณ์
$h, r(z), J$	ขั้นเวลา, residual ของขั้นนั้น, Jacobian ของ residual
$\lambda = \sigma \pm j\omega_d$	eigenvalue ของเมทริกซ์ state ที่ลดรูปแล้ว
f_m, ζ	ความถี่ modal และ damping ratio
Ω	อัตราการสลายของรากที่ช้าที่สุดของชุด candidate นั้น
$J_V, J_f, S(t)$	ดัชนีย่อยแรงดัน, ดัชนีย่อยความถี่, ดัชนีความรุนแรงรวม
$\Gamma_{on}, \Gamma_{off}$	ระดับกระตุ้นเข้าสู่ GFM และระดับปลดกลับสู่ GFL
$T_{d,on}, T_{d,off}$	เวลาหน่วงคงสถานะขาเข้า และขาออก
δ, ω	มุมโรเตอร์ และความเบี่ยงเบนความเร็วต่อหน่วยของ SG
$E_q^{'}, E_d^{'}, E_q^{''}, E_d^{''}$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่และชั่วครู่ย่อยของ SG
i_d, i_q	กระแสตัวกรองแกน d, q ของ IBR (ใช้ร่วมทั้งสองโหมด)
V_{dc}, I_{dc}	แรงดันบัส DC และกระแสของแหล่งจ่าย DC (state ร่วม)
θ_{PLL}, ξ_{PLL}	มุม PLL และตัวอินทิเกรตของ PLL (มีเฉพาะ GFL)
$\theta_{VSG}, \omega_{VSG}, E$	มุม ความถี่ และแอมพลิจูดแรงดันของ VSG (มีเฉพาะ GFM)
$\Pi_I(\cdot; I_{max})$	ตัวจำกัดกระแสอ้างอิงแบบวงกลม

2. โครงสร้างระบบศึกษาและสายงาน PF–DAE–SSSA–TS

โครงงานพัฒนาสายงานคำนวณแบบต่อเนื่องโดยใช้ข้อมูลเครือข่าย จุดทำงาน และแบบจำลองอุปกรณ์ชุดเดียวกันตลอดทั้ง PF, DAE equilibrium, SSSA และ TS จุดประสงค์สำคัญคือไม่ให้แต่ละขั้นตอนใช้สมมติฐานหรือ state ที่ไม่ตรงกัน จึงย้อนตรวจได้ว่าผล SSSA และ TS เริ่มจาก operating point เดียวกับที่ PF คำนวณได้จริง

$$\dot{x} = f(x, y, u), \qquad 0 = g(x, y, u) = Y_{\text{net}}V - I_{\text{bus}}(x, V) \tag{1}$$

โดย x คือ differential states ของ SG และ IBR ทุกตัว, y คือ algebraic bus voltages ในรูปส่วนจริงและส่วนจินตภาพ, u คือ set-point และข้อมูล event ส่วน Y_{net} สร้างจากข้อมูลสายส่ง หม้อแปลงที่มี tap และ shunt ของ IEEE 14-bus ทั้งหมด สมการที่สองของ (1) คือข้อบังคับว่า ณ ทุกบัสและทุกขั้นเวลา กระแสที่ไหลออกทางเครือข่ายต้องเท่ากับกระแสที่อุปกรณ์อัดเข้ามาพอดี convention ที่ใช้ตลอดทั้งสายงานคือกระแสบวกหมายถึงการฉีดเข้าสู่โครงข่าย และกำลังเชิงซ้อน $S = VI^*$



รูปที่ 2 สายงานคำนวณของการสลับโหมด ตั้งแต่ PF ถึง TS

3. PF และการสร้าง operating point ของ IEEE 14-bus

PF ใช้หาขนาดแรงดันและมุมของทุกบัสก่อนเริ่มการวิเคราะห์เชิงพลวัต สำหรับบัส i กำลังสุทธิที่ฉีดเข้าโครงข่ายเขียนได้เป็น

$$P_i + jQ_i = V_i \left(\sum_{j=1}^{N} Y_{ij} V_j \right)^* . \tag{2}$$

บัสถูกแบ่งเป็น REF, PV และ PQ ตามตัวแปรที่กำหนดและตัวแปรที่ต้องแก้ โดยบัส REF กำหนด $|V|$ และ θ, บัส PV กำหนด P และ $|V|$, ส่วนบัส PQ กำหนด P และ Q ตัวแก้แบบ Newton–Raphson สร้างค่าคลาดเคลื่อน $\Delta P, \Delta Q$ แล้วแก้ระบบเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V| \end{bmatrix}, \tag{3}$$

ซ้ำจนค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จากนั้นผลแรงดันเชิงซ้อน $V_i = |V_i| e^{j\theta_i}$ ถูกส่งต่อให้ตัวสร้าง state ของ SG และ IBR โดยตรง โครงงานนี้ ไม่ สร้าง operating point ชุดใหม่สำหรับ SSSA หรือ TS ซึ่งเป็นเหตุผลที่ผลทั้งสามขั้นตอนสอดคล้องกันโดยตรวจสอบย้อนได้

ผล PF ของกรณีที่ SG ยังเชื่อมต่ออยู่แสดงในตารางที่ 2 SG ที่บัส 1 เป็น reference source ในช่วงเริ่มต้น และ IBR อยู่ที่บัส 2, 3, 6 และ 8

ตารางที่ 2 ผล PF ของบัสทั้งหมดในระบบ IEEE 14-bus ก่อนเกิด disturbance ($|V|$ ในหน่วย pu, θ ในหน่วยองศา, กำลังรายบัสในหน่วย pu)

Bus	Type	$\|V\|$	θ	P_{gen}	Q_{gen}	P_{load}	Q_{load}
1	SLACK	1.0000	0.0000	1.3319	−0.1957	0.0000	0.0000
2	GFL	0.9914	−3.2585	0.3172	0.1767	0.2170	0.1270
3	GFL	0.9667	−8.6921	0.2884	0.1607	0.9420	0.1900
4	PQ	0.9832	−6.7064	0.0000	0.0000	0.4780	−0.0390
5	PQ	0.9858	−5.5221	0.0000	0.0000	0.0760	0.0160
6	GFL	1.0575	−6.7136	0.4443	0.2476	0.1120	0.0750
7	PQ	1.0253	−6.9205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	GFL	1.0494	−4.4090	0.2677	0.1491	0.0000	0.0000
9	PQ	1.0219	−8.6416	0.0000	0.0000	0.2950	0.1660
10	PQ	1.0202	−8.5886	0.0000	0.0000	0.0900	0.0580
11	PQ	1.0347	−7.7782	0.0000	0.0000	0.0350	0.0180
12	PQ	1.0411	−7.6862	0.0000	0.0000	0.0610	0.0160
13	PQ	1.0342	−7.8345	0.0000	0.0000	0.1350	0.0580
14	PQ	1.0087	−9.3374	0.0000	0.0000	0.1490	0.0500

ผลสำคัญ PF ลู่เข้าโดยใช้บัส 1 เป็น SLACK; IBR อยู่ที่บัส 2, 3, 6 และ 8 และค่ากำลังฉีดของทุกอุปกรณ์ถูกส่งต่อไปสร้าง DAE equilibrium โดยไม่สร้าง operating point ชุดใหม่

การตรวจสอบผล PF ไม่ได้ดูเพียงว่าตัวแก้รายงานว่าลู่เข้า แต่ตรวจสมดุลกำลังของทุกบัส การไหลและกำลังสูญเสียของทุกกิ่ง และค่ากระแสที่คำนวณย้อนกลับจาก $S = VI^*$ จากนั้นเมื่อแปลงผล PF ไปเป็น DAE equilibrium จะคง KCL ของทุกบัสไว้ครบ ไม่ตัด KCL ของบัส REF ออกเพื่อทำให้ระบบสมการเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ใช้การตรึงพิกัดอ้างอิงและแก้ค่าคำสั่งควบคุมที่เหมาะสมแทน

เหตุผลของการเลือกวิธีนี้คือ การตัด KCL หนึ่งแถวทำให้ reduced residual มีค่าเล็กได้แม้ KCL ทางกายภาพยังไม่สมดุล ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่ตรวจไม่พบจากค่า residual เพียงอย่างเดียว

4. DAE equilibrium และแบบจำลอง SG

หลัง PF ได้แรงดันและกำลังของแต่ละอุปกรณ์ จะสร้าง state เริ่มต้นและแก้สมการ $f = 0$ ร่วมกับ KCL $g = 0$ อีกครั้ง จุดสมดุลนี้เป็นจุดเริ่มต้นร่วมของ SSSA และ TS สำหรับ SG ที่บัส 1 ใช้แบบจำลอง round-rotor sixth-order ตามที่ Kundur [1] กับ Sauer และ Pai [2] วางไว้ และตามแนวปฏิบัติของ IEEE Std 1110 [4] โดย state ที่เก็บคือ

$$x_{SG} = [\delta, \omega, E'_q, E'_d, E''_q, E''_d]^T, \tag{4}$$

และแกนกลใช้ swing equation

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega, \quad 2H\dot{\Delta\omega} = T_m - T_e - D\Delta\omega \tag{5}$$

ส่วน transient/subtransient EMF ใช้ time constants และ reactances ของโปรไฟล์ IEEE 14-bus ในโปรเจกต์ กรณีนี้ $T'_{q0} = 0$ จึงเป็น singular limit และ state E'_d ถูกตรึงที่ค่าพีชคณิตก่อน equilibrium/SSSA ทำให้ SG มี active dynamic states จริง 5 ตัว ไม่ใช่การเพิ่ม time constant เล็ก ๆ เพื่อหลบ singularity

เมื่อ SG breaker เปิด SG จะหยุดฉีดกระแสเข้าระบบ แต่ state ทางกลและ flux ยังถูก integrate ต่อในเส้นทาง breaker-open coast จึงสามารถตรวจ synchronism ก่อน reclose ได้ โดยไม่ reset มุมหรือความเร็วของ SG ให้เท่ากับบัสแบบบังคับ

5. การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (SSSA)

SSSA ใช้ตรวจพฤติกรรมของระบบเมื่อถูกรบกวนขนาดเล็กรอบ equilibrium โดย linearize สมการ DAE ชุดเดียวกับที่ใช้ใน TS

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \tag{6}$$

เมื่อ g_y ไม่เอกฐาน สามารถกำจัด algebraic perturbation ด้วย Schur complement ได้

$$A_{\text{red}} = f_x - f_y g_y^{-1} g_x, \quad \Delta\dot{x} = A_{\text{red}} \Delta x. \tag{7}$$

Eigenvalue $\lambda = \sigma \pm j\omega_d$ ใช้บอกอัตราการสลายและความถี่การแกว่งของแต่ละ mode โดย

$$f_m = \frac{|\omega_d|}{2\pi}, \quad \zeta = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2}}. \tag{8}$$

หาก eigenvalue ที่เป็น physical decision roots ทั้งหมดมีส่วนจริงเป็นลบ ระบบที่จุดนั้นมีเสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม SSSA ให้ผลเชิงเส้นเฉพาะที่รอบจุดสมดุลเท่านั้น จึงไม่ใช้แทนการจำลองไม่เชิงเส้น

การจัดการ reference angle เป็นส่วนสำคัญของ SSSA เนื่องจากระบบมีอิสระของมุมร่วมหนึ่งค่า โครงงานจัดการ gauge ก่อนคำนวณ eigenvalue ด้วยการฉายลงพิกัดที่ active และพิกัดอ้างอิงตาม configuration จริง ไม่ใช้วิธีคำนวณ eigenvalue ก่อนแล้วค่อยลบ zero root ออกภายหลัง และยังเก็บ KCL ทางกายภาพทุกแถวไว้ครบ วิธีนี้ทำให้จำนวน root ที่ใช้ตัดสินใจสอดคล้องกับจำนวนองศาอิสระที่แท้จริงของระบบ

สำหรับ configuration ตัวแทนหลัง SG offline ที่ IBR บัส 2 เป็น GFM และ IBR บัส 3, 6, 8 เป็น GFL spectrum อยู่ในระนาบครึ่งซ้ายทั้งหมด mode ที่อยู่ขวาสุดคือ

$$\lambda = -0.328014 \pm j0.448860 \text{ s}^{-1}, \quad f_m = 0.071438 \text{ Hz}, \quad \zeta = 0.590017. \tag{9}$$

ในกลุ่ม PLL mode พบคู่ $-0.566771 \pm j2.132137$ s^{-1} ที่ $f_m = 0.33934$ Hz และ $\zeta = 0.256901$ ส่วน DC link ของ IBR ทั้งสี่ตัวให้คู่ mode ใกล้ $15.18–15.66$ Hz และ $\zeta \approx 0.707$ ซึ่งตรงกับค่า damping ratio เป้าหมายของวงจร DC ที่กำหนดไว้ก่อนคำนวณ spectrum จึงใช้เป็นการตรวจความสอดคล้องของแบบจำลองได้

ตารางที่ 3 ผล SSSA ของ configuration ตัวแทนเมื่อ SG offline: IBR2 เป็น GFM และ IBR3/6/8 เป็น GFL (eigenvalue ในหน่วย s^{-1})

Mode	$\boldsymbol{Real}\{\lambda\}, \boldsymbol{Imag}\{\lambda\}$	$\boldsymbol{f}$ (Hz)	Damping Ratio	Dominant state
30	$-0.3280 \pm j\,0.4489$	0.0714	0.5900	IBR2 ξ_{Vd} (GFM)
29	$-0.5668 \pm j\,2.1321$	0.3393	0.2569	IBR3 θ_{PLL} (GFL)
28	$-0.5889 \pm j\,2.1717$	0.3456	0.2617	IBR6 θ_{PLL} (GFL)
27	$-1.1855 \pm j\,2.9807$	0.4744	0.3696	IBR2 ξ_{Vd} (GFM)
10	$-98.4062 \pm j\,98.3803$	15.6577	0.7072	IBR2 I_{dc}
11	$-96.4556 \pm j\,96.3252$	15.3306	0.7076	IBR8 V_{dc}
12	$-96.3465 \pm j\,96.2079$	15.3120	0.7076	IBR3 V_{dc}
13	$-95.5555 \pm j\,95.3486$	15.1752	0.7079	IBR6 V_{dc}

ผลสำคัญ spectrum ทางกายภาพของ configuration นี้อยู่ในระนาบครึ่งซ้ายทั้งหมด โดย mode ที่อยู่ขวาสุดคือ $-0.328014 \pm j0.448860$ s^{-1} และคู่ mode ของ DC link มี damping ratio ใกล้ 0.707 ตามค่าเป้าหมายที่ออกแบบไว้

เมื่อ SG offline ชุดย่อยของ IBR ที่เป็นไปได้ทั้งหมดมี $2^4 - 1 = 15$ ชุด ระบบแก้จุดสมดุลและ SSSA ของทุกชุดจากเครือข่ายจริงของชุดนั้น ไม่ประมาณจากจำนวน GFM เพียงอย่างเดียว ผลที่ได้คือผ่านเกณฑ์ 7 จาก 15 ชุด โดยชุดที่ให้ damping margin ดีที่สุดคือชุดสองตัวที่บัส 3 และบัส 6 ซึ่งมี $\Omega = -0.56814$ s^{-1} ในขณะที่การให้ทั้งสี่ตัวเป็น GFM ให้ $\Omega = -0.48291$ s^{-1} และชุดตัวเดียวที่ดีที่สุดให้ $\Omega = -0.32801$ s^{-1} ผลนี้แสดงว่าการเพิ่มจำนวน GFM ไม่ได้ทำให้ damping margin ดีขึ้นแบบทางเดียว ซึ่งเป็นเหตุผลที่ตารางชุด candidate ต้องคำนวณจริงทุกชุด ไม่สามารถอนุมานจากจำนวนอุปกรณ์ได้

ตารางที่ 4 สรุปการคัดกรองชุด candidate ของ GFM ทั้ง 15 ชุดเมื่อ SG offline

จำนวน GFM	จำนวนชุด	ผ่าน	ข้อสังเกต
1	4	4	ทุกชุดตัวเดียวผ่านการคัดกรองเชิงเส้น; ชุดที่ดีที่สุดคือบัส 2 ($\Omega = -0.32801$)
2	6	2	ชุดบัส 2+6 และบัส 3+6 ผ่าน; ชุดหลังให้ margin ดีที่สุดของตารางทั้งหมด
3	4	0	ไม่มีชุดใดหา equilibrium ได้ภายใต้ข้อจำกัดของอุปกรณ์
4	1	1	ผ่าน SSSA แต่ยังต้องทดสอบว่าวิถีไม่เชิงเส้นไปถึงชุดนี้ได้จริงหรือไม่

ผลสำคัญ ชุดที่ผ่านเกณฑ์ไม่เป็นฟังก์ชันทางเดียวของจำนวน GFM: ชุดสามตัวไม่มีชุดใดผ่านเลย ในขณะที่ชุดสองตัวและชุดสี่ตัวผ่าน ผลนี้ทำให้การแจงนับทุกชุดเป็นสิ่งจำเป็น ไม่ใช่ทางเลือก

6. การจำลองในโดเมนเวลา (TS) และตัวแก้สมการเชิงตัวเลข

TS ใช้สมการ DAE เดียวกับ (1) แล้ว discretize differential states ด้วย implicit trapezoidal method

$$x_{k+1} - x_k - \frac{h}{2}[f(x_k, y_k, u_k) + f(x_{k+1}, y_{k+1}, u_{k+1})] = 0, \quad g(x_{k+1}, y_{k+1}, u_{k+1}) = 0 \tag{10}$$

Unknown ของแต่ละ step จึงประกอบด้วย differential และ algebraic variables พร้อมกัน ตัวแก้ใช้ Newton แบบมีการหน่วง

$$J(z^{(m)})\Delta z = -r(z^{(m)}), \quad z^{(m+1)} = z^{(m)} + \alpha\Delta z, \quad 0 < \alpha \leq 1, \tag{11}$$

และรับ step เมื่อ residual ไม่เชิงเส้นผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ก่อน สำหรับผลหลักในรายงานนี้ทุก step ที่ยอมรับมี $\|r\|_\infty < 10^{-8}$

เส้นทาง adaptive ใช้แนวคิด step-doubling ของ trapezoidal method: ทดลองหนึ่ง full step และสอง half steps แล้วประเมิน local error จากความต่างของคำตอบลำดับสอง

$$e_{LTE} \approx \frac{z_{h/2,h/2} - z_h}{2^2 - 1} = \frac{z_{h/2,h/2} - z_h}{3} \tag{12}$$

หาก Newton ไม่ลู่เข้า, state ออกนอกขอบเขตทางกายภาพที่อุปกรณ์ประกาศไว้ หรือค่าความคลาดเคลื่อนเฉพาะที่สูงเกินเกณฑ์ step นั้นจะถูกปฏิเสธและย้อนกลับไปยัง state ที่ยอมรับแล้วก่อน ลด h ใหม่ ดังนั้นวิถีที่นำไปพล็อตจึงไม่มี trial ที่ถูกปฏิเสธปะปนอยู่เลย

อีกจุดหนึ่งที่สำคัญคือการลงจุดเหตุการณ์อย่างแม่นยำ เมื่อมีการปลด SG เพิ่มโหลด เกิด fault เคลียร์ fault ปลดสายส่ง หรือสลับโหมด ตัวอินทิเกรตจะตัด step ให้ปลาย step ตรงกับเวลาเหตุการณ์ก่อน จากนั้นจึงเปลี่ยนโครงสร้างเครือข่ายหรือโหมด แล้วแก้สมการพีชคณิตของลิมิตขวาใหม่ วิธีนี้ป้องกันการที่สมการก่อนและหลังเหตุการณ์อยู่ใน trapezoidal step เดียวกัน ซึ่งจะทำให้ผลของขั้นนั้นไม่มีความหมายทางกายภาพ

การทดสอบ regression ของเส้นทาง solver แยกชัดระหว่างโหมดขั้นเวลาคงที่และโหมดปรับขั้นเวลาอัตโนมัติ โดยกรณี IEEE 14-bus ที่ไม่ได้เปิดตัวเลือกปรับขั้นเวลาให้ผลตรงกับการระบุขั้นเวลาคงที่อย่างชัดแจ้งแบบ bit-identical ทั้ง t, x, y, ประวัติ input และบันทึกเหตุการณ์ ผลนี้ยืนยันว่าการเพิ่มตัวควบคุมขั้นเวลาไม่ได้เปลี่ยนผลของเส้นทางเดิมโดยไม่ตั้งใจ

7. แบบจำลอง IBR แบบสองโหมด GFL/GFM ขนาด 17 state

IBR ที่ใช้ในกรณีหลักประกอบขึ้นจากบล็อกควบคุมมาตรฐานที่อ้างถึงในหัวข้อที่ 1 แล้วจัดให้อยู่ใน fixed-layout device เดียว เพื่อให้เปลี่ยนโหมดระหว่าง GFL และ GFM ได้โดยไม่เปลี่ยนขนาด state vector กลางการจำลอง แต่ละ IBR มี 17 coordinates และสามารถแบ่ง state ได้เป็นสามกลุ่ม

$$x_{IBR} = \begin{bmatrix} x_p^T & x_{GFL}^T & x_{GFM}^T \end{bmatrix}^T, \tag{13}$$

โดย

$$x_p = [i_d,\ i_q,\ V_{dc},\ I_{dc}]^T, \tag{14}$$

$$x_{GFL} = [\theta_{PLL},\ \xi_{PLL},\ \xi_P,\ \xi_Q,\ \xi_{Id}^{GFL},\ \xi_{Iq}^{GFL}]^T, \tag{15}$$

$$x_{GFM} = [\theta_{VSG},\ \omega_{VSG},\ E,\ \xi_{Vd},\ \xi_{Vq},\ \xi_{Id}^{GFM},\ \xi_{Iq}^{GFM}]^T \tag{16}$$

เมื่อนำทั้งสามกลุ่มมาเรียงใน fixed layout จะได้

$$x_{IBR} = [i_d, i_q, V_{dc},\ \theta_{PLL}, \xi_{PLL}, \xi_P, \xi_Q, \xi_{Id}^{GFL}, \xi_{Iq}^{GFL}, \theta_{VSG}, \omega_{VSG}, E, \xi_{Vd}, \xi_{Vq}, \xi_{Id}^{GFM}, \xi_{Iq}^{GFM}, I_{dc}]^T \tag{17}$$

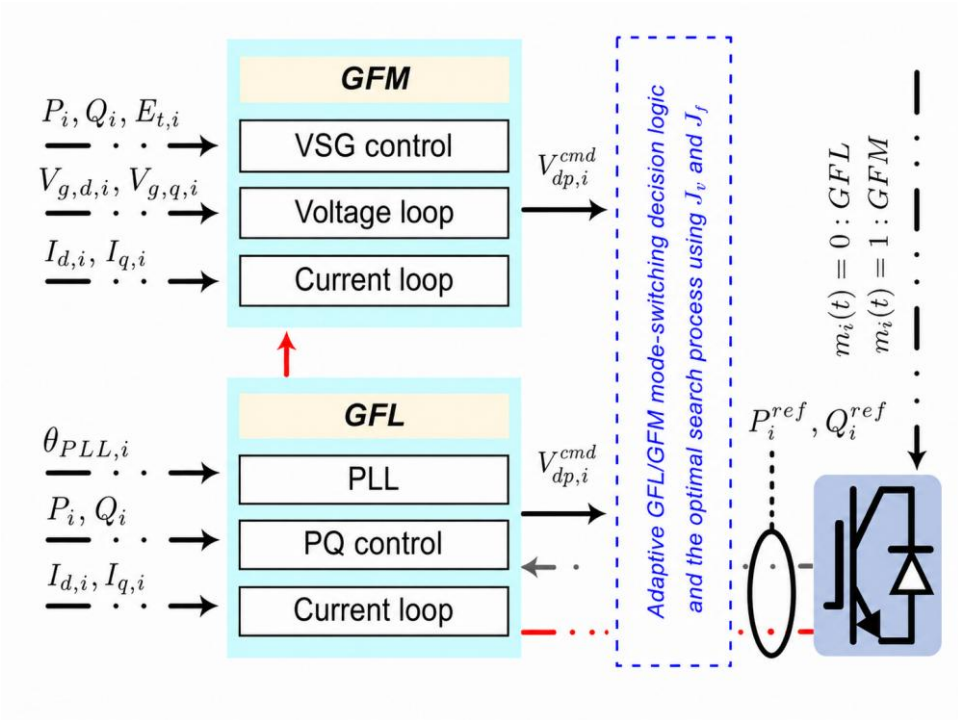
กลุ่ม x_p เป็น physical plant states ที่ใช้ร่วมกันในทั้งสองโหมดและ evolve ตลอดเวลา ส่วน x_{GFL} และ x_{GFM} เป็น controller states คนละ branch และ **ไม่ถูกใช้งานพร้อมกัน**. เมื่ออุปกรณ์อยู่ในโหมด GFL จะ active เฉพาะ x_p และ x_{GFL} ขณะที่ x_{GFM} ถูก hold ด้วย $\dot{x}_{GFM} = 0$; เมื่อสลับเป็น GFM จะ active เฉพาะ x_p และ x_{GFM} ขณะที่ x_{GFL} ถูก hold ด้วย $\dot{x}_{GFL} = 0$. ดังนั้นโครงสร้างนี้เป็น mode-switched controller ไม่ใช่การนำ GFL และ GFM มาควบคุม converter พร้อมกัน

ใน index ของ fixed 17-state layout โหมด GFL ใช้ active states $\{1{:}9, 17\}$ รวม 10 ตัว และโหมด GFM ใช้ $\{1{:}3, 10{:}17\}$ รวม 11 ตัว โดย state ของ branch ที่ไม่ active ถูกเก็บไว้เป็น memory/anchor สำหรับ state-transfer ตอนสลับโหมด ไม่สร้าง artificial decay pole เพื่อบังคับ state กลับเอง

ตารางที่ 5 การแบ่ง state ownership ของ IBR แบบ dual-mode

กลุ่ม	State	GFL	GFM	หน้าที่
Common	i_d, i_q, V_{dc}, I_{dc}	Active	Active	physical AC/DC plant; ใช้ร่วมกันและ evolve ต่อเนื่อง
GFL branch	$\theta_{PLL}, \xi_{PLL}, \xi_P, \xi_Q, \xi_{Id}^{GFL}, \xi_{Iq}^{GFL}$	Active	Hold	PLL, P/Q control และ current-control integrators ของ GFL
GFM branch	$\theta_{VSG}, \omega_{VSG}, E, \xi_{Vd}, \xi_{Vq}, \xi_{Id}^{GFM}, \xi_{Iq}^{GFM}$	Hold	Active	VSG, voltage-forming และ current-control integrators ของ GFM

ผลสำคัญ ในหนึ่ง IBR ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง controller branch ที่ active มีได้เพียงหนึ่งชุด: GFL **หรือ** GFM Common plant states ทำงานตลอด ส่วน branch ที่ไม่ active จะถูก hold และใช้เป็น state memory สำหรับการสลับครั้งถัดไป



รูปที่ 3 โครงสร้างการควบคุมของ IBR แบบสองโหมด สาขา GFM (VSG, วงแรงดัน, วงกระแสชั้นใน) และสาขา GFL (PLL, วง P–Q, วงกระแสชั้นใน)

$$V_{dq,i} = V_i\, e^{-j\theta_i} = v_d + jv_q \qquad i_{s,i} = \left(i_d + ji_q\right)e^{j\theta_i} \qquad I_i = \frac{i_{s,i}}{\kappa} \tag{18}$$

$$S_i = V_i\, I_i^{\,*} \qquad P_{\text{inv}} = \kappa \text{Re}\left\{S_i\right\} \qquad Q_{\text{inv}} = \kappa \text{Im}\left\{S_i\right\} \tag{19}$$

Common AC filter ทั้งสองโหมดใช้กระแส filter และ DC link ร่วมกัน โดยใน synchronous dq frame

$$i_d = \frac{\omega_b}{L_f}\left(v_{cd} - v_d - R_f i_d + \omega_{pu} L_f i_q\right), \tag{20}$$

$$i_q = \frac{\omega_b}{L_f}\left(v_{cq} - v_q - R_f i_q - \omega_{pu} L_f i_d\right). \tag{21}$$

$$\omega_{\text{pu}} = \begin{cases} 1 + \dot{\theta}_{\text{PLL}}/\omega_b & \text{โหมด GFL} \\ \omega_{\text{VSG}} & \text{โหมด GFM} \end{cases} \qquad \omega_b = 2\pi\, f_0 \tag{22}$$

กระแส physical i_d, i_q เป็น differential states จริง ตัว current limiter จำกัด current reference ที่ controller สั่ง ไม่ได้ clip state ของ filter แบบพีชคณิต เพราะการ clip state จะเปลี่ยน terminal KCL โดยตรง

$$v_{\text{cd}} = v_d + R_f\, i_d - \omega_{\text{pu}} L_f\, i_q + k_{p,I}\left(i_d^{\,*} - i_d\right) + k_{i,I}\xi_{\text{Id}} \tag{23}$$

$$v_{\text{cq}} = v_q + R_f\, i_q + \omega_{\text{pu}} L_f\, i_d + k_{p,I}\left(i_q^{\,*} - i_q\right) + k_{i,I}\xi_{\text{Iq}} \tag{24}$$

$$\dot{\xi}_{\text{Id}} = i_d^{\,*} - i_d \qquad \dot{\xi}_{\text{Iq}} = i_q^{\,*} - i_q \tag{25}$$

$$r^* = \sqrt{\left(i_{d,raw}^{\,*}\right)^2 + \left(i_{q,raw}^{\,*}\right)^2} \tag{26}$$

$$\left(i_d{}^*, i_q{}^*\right) = \Pi_I\left(i_{d,raw}{}^*, i_{q,raw}{}^*; I_{\max}\right)$$
$$= \begin{cases} \left(i_{d,raw}{}^*, i_{q,raw}{}^*\right) & r^* \leq I_{\max} \\ \frac{I_{\max}}{r^*}\left(i_{d,raw}{}^*, i_{q,raw}{}^*\right) & r^* > I_{\max} \end{cases}$$
$$\rho_d = i_{d,raw}{}^* - i_d{}^* \quad \rho_q = i_{q,raw}{}^* - i_q{}^*$$
$$\dot{\xi} = \begin{cases} 0 & r^* > I_{\max} \text{ และ } g\ e\ \rho > 0 \\ e & \text{กรณีอื่น} \end{cases} \tag{27}$$

DC-link และแหล่ง DC แบบไม่อุดมคติ สมการพลังงานของ DC link ต้องรู้กฎของ I_{dc} ด้วย โครงงานจึงใช้ Thevenin source ที่มี internal resistance และ source-current state

$$C_{dc}\dot{V}_{dc} = I_{dc} - \frac{P_{ac}}{V_{dc}} - \frac{\max(0, V_{dc} - V_{dc}^{max})}{R_{ch}}, \tag{28}$$
$$\tau_s \dot{I}_{dc} = \frac{E_{dc} - V_{dc}}{R_{dc}} - I_{dc}, \tag{29}$$
$$P_{\mathrm{ac}} = v_{\mathrm{cd}} i_d + v_{\mathrm{cq}} i_q \tag{30}$$

ค่า E_{dc} ถูกคำนวณจากเงื่อนไขให้ dispatched point เป็น equilibrium จึงไม่ปรับเพื่อทำให้ผล TS ดูดีขึ้น ส่วน τ_s ถูกเลือกจาก damping criterion ของวงจร DC และตรวจว่าคู่ eigenvalue อยู่ฝั่งซ้ายของระนาบเชิงซ้อนก่อนนำไปใช้

$$E_{\mathrm{dc}} = V_{\mathrm{dc}}{}^0 + \frac{R_{\mathrm{dc}} P_{\mathrm{ac}}{}^0}{V_{\mathrm{dc}}{}^0} \quad R_{\mathrm{dc}} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{dc}}\left(V_{\mathrm{dc}}{}^0\right)^2}{P_r} \quad I_{\mathrm{dc}}{}^0 = \frac{P_{\mathrm{ac}}{}^0}{V_{\mathrm{dc}}{}^0} \tag{31}$$
$$P_{\mathrm{ac}}{}^0 = \kappa\, P_{\mathrm{ref}} + R_f\left[\left(i_d{}^0\right)^2 + \left(i_q{}^0\right)^2\right] \quad R_{\mathrm{ch}} = \frac{(V_{\mathrm{dc}}{}^{\max})^2 \delta_{\mathrm{ch}}(1 + \delta_{\mathrm{ch}})}{P_r}$$

การลด command-delay states แบบจำลองต้นทางมี actuation delay สองแกน แต่ delay เชิงกายภาพจาก digital control ประมาณ $T_d = 1.5/f_{sw} \approx 0.3$ ms ที่ $f_{sw} = 5$ kHz ซึ่งเล็กกว่า phasor time step หลายร้อยเท่า จึงใช้ singular-perturbation reduction $v_{del} = v_{cmd}$ เพื่อตัด fast states ที่ RMS model ไม่สามารถ resolve ได้ การลดนี้คง equilibrium และ retained-state equations เดิม แต่ลด superset จากโครงสร้างเก่า 20 states เหลือ 16 ก่อนเพิ่ม I_{dc} เป็น state ที่ 17

7.1 โหมด Grid-Following: PLL วงกำลัง P/Q และวงกระแสชั้นใน

GFL ทำงานเป็น current-controlled resource และต้องอาศัยแรงดันของโครงข่ายเพื่อกำหนดมุมอ้างอิง PLL แปลงแรงดันบัสเข้าสู่กรอบของตนเองด้วย $V_{dq} = Ve^{-j\theta_{PLL}}$ แล้วใช้ v_q เป็น phase error

$$\dot{\theta}_{PLL} = k_{p,PLL} v_q + k_{i,PLL}\xi_{PLL}, \quad \dot{\xi}_{PLL} = v_q \tag{32}$$

กำลังที่วัดได้คำนวณจาก terminal current จริง จากนั้น outer P/Q PI สร้าง current reference

$$e_P = \kappa P_{ref} - P_{inv}, i_{d,raw}^* = k_{pP} e_P + k_{iP}\xi_P, \tag{33}$$
$$e_Q = \kappa Q_{ref} - Q_{inv}, i_{q,raw}^* = -\left(k_{pQ} e_Q + k_{iQ}\xi_Q\right) \tag{34}$$

เครื่องหมายลบของ i_q^* มาจาก generator-injection convention ของโปรเจกต์ จากนั้น circular limiter Π_I จำกัดขนาด reference ไม่ให้เกิน I_{max} และ inner PI สร้าง v_{cd}, v_{cq} เพื่อขับ filter current ใน (21). เมื่อ limiter ทำงาน outer integrator ใช้ conditional anti-windup: ถ้า error กำลังผลักคำสั่งออกนอกขอบเขตจะ hold integrator แต่ถ้า error ช่วยดึงกลับเข้าขอบเขตจะปล่อยให้ integrate ต่อ

จุดสำคัญของ GFL คือ PLL มีหน้าที่ ตาม มุมของโครงข่าย ดังนั้นหาก SG ถูกปลดและ IBR ทุกตัวยังเป็น GFL ระบบจะไม่มีแหล่ง voltage-forming เหลืออยู่ กรณีตรึง GFL ทั้งหมดจึงถูกปฏิเสธที่ $t = 20$ s ด้วยเหตุผลว่าไม่มีแหล่ง voltage-forming ในโครงข่ายที่ยังจ่ายไฟ แทนที่จะให้ Newton เดินต่อบนระบบที่ไม่มีมุมอ้างอิง การปฏิเสธนี้เป็นผลลัพธ์ที่ถูกต้องของกรณีศึกษา ไม่ใช่ความล้มเหลวของตัวแก้สมการ

7.2 โหมด Grid-Forming: เครื่องซิงโครนัสเสมือนและวง Q–V

GFM ไม่ใช้ PLL ใน active branch แต่สร้างมุมจาก virtual synchronous generator (VSG) ของตัวเอง โครงสร้างนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกับแบบจำลอง grid-forming ที่เผยแพร่เป็นอ้างอิงสาธารณะ [14]

$$M\dot{\omega}_{VSG} = \kappa P_{ref} - P_{inv} - D_v(\omega_{VSG} - 1), \tag{35}$$

$$\dot{\theta}_{VSG} = \omega_b(\omega_{VSG} - 1), \tag{36}$$

$$\dot{E} = \frac{k_Q(\kappa Q_{ref} - Q_{inv}) - k_E(E - E_{ref})}{\tau_E} \tag{37}$$

state E เป็น voltage-forming reference ของ d-axis โดยกำหนด $v_{d,ref} = E$ และ $v_{q,ref} = 0$. Voltage PI แปลง voltage error เป็น current reference แล้วผ่าน current limiter เดียวกับ GFL ก่อนเข้า inner current PI ดังนั้น GFM สามารถสร้างมุมและแรงดันให้ island ได้ด้วยตัวเอง แต่ยังคงข้อจำกัดกระแสของ converter

$$v_d{}^{\mathrm{ref}} = E \qquad v_q{}^{\mathrm{ref}} = 0 \qquad e_{\mathrm{Vd}} = v_d{}^{\mathrm{ref}} - v_d \qquad e_{\mathrm{Vq}} = v_q{}^{\mathrm{ref}} - v_q \tag{38}$$

$$i_{d,raw}{}^* = k_{p,V}e_{\mathrm{Vd}} + k_{i,V}\xi_{\mathrm{Vd}} \qquad i_{q,raw}{}^* = k_{p,V}e_{\mathrm{Vq}} + k_{i,V}\xi_{\mathrm{Vq}} \tag{39}$$

ตารางที่ 6 ความแตกต่างหลักระหว่าง GFL และ GFM ที่ใช้ในโครงงาน

หัวข้อ	GFL	GFM
มุมอ้างอิง	PLL ติดตามแรงดันบัส	VSG สร้างมุมจาก ω_{VSG}
ลักษณะหลัก	current-following	voltage-forming
outer control	P/Q PI สร้าง i_d^*, i_q^*	VSG + Q–V + voltage PI
ใช้เมื่อ SG หาย	อยู่ลำพังไม่ได้	สามารถเป็น reference ของ island
common plant	i_d, i_q, V_{dc}, I_{dc}	i_d, i_q, V_{dc}, I_{dc}
active states	10	11

สมการทั้งหมดในหัวข้อที่ 7 เขียนด้วยสัญลักษณ์ที่มีชื่อ ไม่มีค่าคงตัวใดปรากฏในสมการโดยตรง ตารางที่ 7 จึงเป็นที่เดียวที่ค่าตัวเลขของอุปกรณ์ถูกประกาศ พร้อมชั้นข้อมูลของแต่ละค่าตามที่กรณีศึกษาจำแนกไว้

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ของ IBR แบบสองโหมดและของแหล่งจ่าย DC

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่า
$S_{\text{base}}, M_{\text{base}}$	ฐานกำลังของระบบ และของคอนเวอร์เตอร์	100, 100 MVA
f_0	ความถี่ฐาน	60 Hz
L_f, R_f	ตัวเหนี่ยวนำและความต้านทานของตัวกรอง	0.15, 0.015 pu
$C_{\text{dc}}, V_{\text{dc}}{}^0$	คาปาซิแตนซ์และแรงดันอ้างอิงของบัส DC	0.10 pu, 1.00 pu
$I_{\max}$	ขีดจำกัดขนาดกระแสอ้างอิง (ฐานอุปกรณ์)	1.20 pu
$k_{p,PLL}, k_{i,PLL}$	เกนของ PLL (เฉพาะ GFL)	1.20, 5.00
$k_{p,P}, k_{i,P}$	เกนวงกำลังจริงชั้นนอก (เฉพาะ GFL)	0.80, 2.50
$k_{p,Q}, k_{i,Q}$	เกนวงกำลังรีแอกทีฟชั้นนอก (เฉพาะ GFL)	0.80, 2.50
$k_{p,I}, k_{i,I}$	เกนวงกระแสชั้นใน (ใช้ร่วมทั้งสองโหมด)	0.30, 4.00
M	ความเฉื่อยเสมือนของ VSG ($H_v = 0.04$ s)	0.08 pu
D_v	สัมประสิทธิ์ droop ของ VSG (droop 5 %)	20.0 pu
k_Q, k_E, τ_E	เกนและค่าคงตัวเวลาของวง Q–V	0.25, 8.00, 0.05 s
$k_{p,V}, k_{i,V}$	เกนวงแรงดัน (เฉพาะ GFM)	1.20, 4.50
$\varepsilon_{\text{dc}}, P_r$	การควบคุมแรงดันของแหล่ง DC และพิกัดกำลัง	0.10, 1.00 pu
$V_{\text{dc}}{}^{\max}, \delta_{\text{ch}}$	ระดับเริ่มทำงานของ chopper และ overshoot ที่ยอมรับ	1.10 pu, 0.02
$\tau_s, \zeta^\star$	ค่าคงตัวเวลาของแหล่ง DC และ damping เป้าหมาย	0.005 s, $1/\sqrt{2}$
ε_I	เกณฑ์ความต่อเนื่องของกระแสตอนสลับโหมด	10^{-10} pu

7.3 การถ่ายโอนโหมด GFL↔GFM และเกตความต่อเนื่อง

การเปลี่ยนโหมดไม่ใช้วิธี cold restart controller ทั้งหมด เพราะจะทำให้ terminal current กระโดด ขั้นตอน transfer ของโครงงานรักษา common plant states i_d, i_q, V_{dc}, I_{dc} ไว้ แล้ว initialize เฉพาะ controller branch ปลายทางจากแรงดันและกำลังที่ terminal เดิม

$$S^- = V(I^-)^* = P^- + jQ^-, \quad x^+ = R(x^-, y^-, u^-, u^+) \tag{40}$$

หลังสร้าง state ขวามือแล้วจะคำนวณกระแสใหม่และตรวจ

$$|I^+ - I^-| \le \varepsilon_I \quad P^+ = P^- \quad Q^+ = Q^- \tag{41}$$

หากไม่ผ่าน gate transaction จะถูก reject ก่อน commit state เข้าสู่ trajectory นอกจากนี้ การ GFL→GFM จะ carry ความถี่ที่ PLL วัดได้ไปตั้งต้น ω_{VSG} และการ GFM→GFL จะ carry

ความถี่ VSG ไปยัง PLL integrator เพื่อให้ frequency coordinate ต่อเนื่องมากที่สุด ขณะที่ inactive branch ถูกเก็บไว้เป็น anchor และไม่ evolve

เกณฑ์ ε_I ในสมการที่ 41 เป็นค่าของอุปกรณ์เอง ไม่ใช่ค่าคงตัวที่รายงานตั้งขึ้น และปรากฏพร้อมค่าตัวเลขในตารางที่ 7

การพิสูจน์ transfer ใช้ falsification tests ที่คำนวณ I, P, Q ก่อนและหลังจาก production current-injection function โดยตรง รวมถึง rigid-frame rotation test: เมื่อหมุนแรงดันทั้งระบบและมุมภายในด้วยมุมเดียวกัน phasor current ต้องหมุนตาม แต่ P, Q ต้องคงเดิม ผลที่ผ่านเงื่อนไขนี้ช่วยยืนยันว่า state map ไม่ผูกกับ absolute network angle แบบผิดพลาด

7.4 การพิสูจน์ว่าการสลับโหมดไม่ทำให้กระแสกระโดด และ transient มาจากที่ใด

หัวข้อนี้พิสูจน์การสลับโหมดเป็นขั้น ๆ จากรูปสมการของระบบไปจนถึงนิพจน์ที่โค้ดเขียนจริง เพื่อให้ข้อความว่า **กระแสไม่กระโดด** เป็นผลที่ตามมาจากพีชคณิต ไม่ใช่ผลของการตั้งค่าเกณฑ์ ทุกขั้นตอนถูกตรวจกับ closure ของโค้ดการผลิตด้วยสคริปต์ verify_mode_switch_algebra.m และค่าคงเหลือของทุกขั้นอยู่ในตารางที่ 8

รูปของระบบที่สลับได้ เริ่มจากรูปของระบบ อุปกรณ์หนึ่งตัวมีเวกเตอร์สเตต**ชุดเดียว** และมีสนามเวกเตอร์ **สองชุด** ที่ถูกเลือกด้วยโหมด $m_i(t)$ ซึ่งตัวกำกับคอมมิท โหมดจึงเป็น**อินพุตแบบไม่ต่อเนื่อง** ของสมการเชิงอนุพันธ์ ไม่ใช่สเตตของมัน อุปกรณ์ที่ออฟไลน์หรือถูกปลด (tripped) แสดงด้วยตัวชี้ $\chi_i = 0$ ซึ่งทำให้สนามเวกเตอร์เป็นศูนย์ทั้งแถว จึงไม่ต้องมีสาขาแยกในสมการที่ 42

$$\dot{x}_i = \chi_i\, f_{m_i(t)}(t, x_i, y, u_i) \qquad m_i(t) \in \{0,1\} \qquad \chi_i \in \{0,1\} \tag{42}$$

$$f_m = \begin{cases} [f_p{}^{(0)};\ f_{\mathrm{GFL}}{}^{c};\ 0_7] & m = 0\ (\mathrm{GFL}) \\ [f_p{}^{(1)};\ 0_6;\ f_{\mathrm{GFM}}{}^{c}] & m = 1\ (\mathrm{GFM}) \end{cases}$$

ชุดแอ็กทีฟของแต่ละโหมดคือดัชนีที่ตัวอินทิเกรตเดินหน้าจริง มิติของมันจึงเปลี่ยนตามโหมด และนี่คือความหมายที่แม่นยำของคำว่า สเตตเพิ่มขึ้นหรือหายไป: ไม่ใช่การสร้างหรือลบตัวแปร แต่เป็นการเปลี่ยนว่าแถวใดถูกอินทิเกรต

$$\mathcal{A}(0) = \{1{:}3, 4{:}9, 17\} \qquad \mathcal{A}(1) = \{1{:}3, 10{:}16, 17\} \tag{43}$$

$$n_{\mathrm{act}} = |\mathcal{A}(m)| = \begin{cases} 10 & m = 0\ (\mathrm{GFL}) \\ 11 & m = 1\ (\mathrm{GFM}) \end{cases}$$

บล็อกที่ไม่ได้อยู่ในชุดแอ็กทีฟถูก**ตรึง** ไม่ใช่ถูกลบ เพราะ dual_f เขียนเฉพาะแถวของสาขาที่ทำงาน แถวของสาขาที่หลับจึงเป็นศูนย์เหมือนกันหมด และค่าของมันค้างอยู่ที่ค่าตอนเข้าสู่สภาพหลับ

$$\dot{x}_k = 0 \quad \forall\, k \notin \mathcal{A}(m) \quad \Longrightarrow \quad x_k(t) = x_k(t_s{}^{+}) \tag{44}$$

ขั้นที่ 1: แถวของกระแสเหลือเฉพาะ PI ชั้นใน ขั้นที่ 1 แทนค่าแรงดันคำสั่งจากสมการที่ 23 และ 24 ลงในแถวของกระแสตัวกรอง จะเห็นว่าพจน์ v_d, $R_f\, i_d$ และพจน์ไขว้ $\omega_{\mathrm{pu}} L_f\, i_q$ ตัดกันหมดพอดี เหลือเพียง PI ชั้นใน

$$\frac{L_f}{\omega_b} i_d = v_{\mathrm{cd}} - v_d - R_f\, i_d + \omega_{\mathrm{pu}} L_f\, i_q \tag{45}$$

$$= \left(v_d + R_f\, i_d - \omega_{\mathrm{pu}} L_f\, i_q + k_{p,I} e_d + k_{i,I} \xi_{\mathrm{Id}}\right) - v_d - R_f\, i_d + \omega_{\mathrm{pu}} L_f\, i_q$$

$$i_d = \frac{\omega_b}{L_f}\left(k_{p,I} e_d + k_{i,I} \xi_{\mathrm{Id}}\right) \qquad i_q = \frac{\omega_b}{L_f}\left(k_{p,I} e_q + k_{i,I} \xi_{\mathrm{Iq}}\right)$$

ผลที่ตามมาสำคัญมากต่อการพิสูจน์ทั้งหมด: โหมดไม่ปรากฏในแถวของกระแสโดยตรงเลย ทางเดียวที่โหมดส่งผลถึงภาคกำลังคือผ่านค่าอ้างอิงกระแส $i_d{}^*, i_q{}^*$ เท่านั้น ดังนั้นถ้าค่าอ้างอิงหลังสลับ

เท่ากับกระแสที่ไหลอยู่ อนุพันธ์ของกระแสก็ไม่กระโดด และนี่คือสิ่งที่แผนที่ถ่ายโอนถูกออกแบบให้เป็นจริง

ขั้นที่ 2: จุดเชื่อมต่อก่อนสลับ ขั้นที่ 2 วัดจุดเชื่อมต่อจากสาขาที่กำลังจะออก โดยใช้ closure ของสาขานั้นเอง ไม่ใช่ค่าคำสั่ง นิพจน์คือสมการที่ 40 ในหัวข้อก่อน

ขั้นที่ 3: แก้สาขาปลายทางที่จุดเชื่อมต่อเดียวกัน ขั้นที่ 3 แก้สาขาปลายทางให้**จุดนั้นเป็นจุดสมดุลของมันเอง** สำหรับ GFM เงื่อนไข $e_{\mathrm{Vd}} = e_{\mathrm{Vq}} = 0$ บังคับให้มุมและขนาดเป็นค่าที่วัดได้ และเงื่อนไข $i^* = i$ บังคับค่าตัวอินทิเกรตของวงแรงดัน จึงไม่ใช่การกำหนดค่าตามใจ แต่เป็นคำตอบของสมการสมดุลของสาขานั้น

$$e_{\mathrm{Vd}} = e_{\mathrm{Vq}} = 0 \iff \theta^+ = \angle V, E^+ = |V| \tag{46}$$

$$i_d{}^* = i_d, i_q{}^* = i_q \iff \xi_{\mathrm{Vd}}{}^+ = \frac{i_d{}^+}{k_{i,V}}, \xi_{\mathrm{Vq}}{}^+ = \frac{i_q{}^+}{k_{i,V}}$$
$$\xi_{\mathrm{Id}}{}^+ = \xi_{\mathrm{Iq}}{}^+ = 0$$
$$\theta^+ = \angle V \quad \xi_{\mathrm{PLL}}{}^+ = 0 \tag{47}$$
$$i_d{}^* = i_d, i_q{}^* = i_q \iff \xi_P{}^+ = \frac{i_d{}^+}{k_{i,P}}, \xi_Q{}^+ = -\frac{i_q{}^+}{k_{i,Q}}$$
$$\xi_{\mathrm{Id}}{}^+ = \xi_{\mathrm{Iq}}{}^+ = 0$$

ขั้นที่ 4: กระแสที่อัดเข้าโครงข่ายเท่าเดิมพอดี ขั้นที่ 4 แทนคำตอบของขั้นที่ 3 กลับเข้าไปในนิยามกระแส จะได้กระแสเดิมกลับมา

$$i_d{}^+ = \kappa\frac{P^-}{|V|} \quad i_q{}^+ = -\kappa\frac{Q^-}{|V|} \quad \theta^+ = \angle V \tag{48}$$
$$I^+ = \frac{i_d{}^+ + j i_q{}^+}{\kappa} e^{j\theta^+} = \frac{P^- - jQ^-}{|V|}\frac{V}{|V|} = \left(\frac{S^-}{V}\right)^* = I^-$$

บรรทัดสุดท้ายคือหัวใจของการพิสูจน์: ค่าที่ได้คือ $(S^-/V)^*$ ซึ่ง**เท่ากับ** I^- ตามนิยามของ $S^- = V(I^-)^*$ ความต่อเนื่องจึงเป็นเอกลักษณ์ ไม่ใช่ค่าประมาณ เกณฑ์ ε_I ในสมการที่ 41 จึงทำหน้าที่เฝ้าการปัดเศษของเครื่องเท่านั้น และค่าที่วัดได้ที่คอมมิทจริงอยู่ในระดับ 10^{-17} ตามตารางที่ 8

ขั้นที่ 5: คู่ dq หมุนตามกรอบ แต่เฟเซอร์ไม่ขยับ ขั้นที่ 5 ต้องแยกให้ชัดว่าอะไรคงที่และอะไรหมุน พิกัด i_d, i_q เป็นกระแสเดียวกันแต่มองใน**กรอบหมุนของสาขาที่ทำงาน** เมื่อสาขาปลายทางยึดกรอบใหม่ที่ $\angle V$ คู่ i_d, i_q จึงหมุนไปตามผลต่างของมุม ในขณะที่เฟเซอร์ I ไม่ขยับ ตามขั้นที่ 4

$$\Delta\theta = \theta^+ - \theta^- \quad i_{\mathrm{dq}}{}^+ = i_{\mathrm{dq}}{}^- e^{-j\Delta\theta} \quad |I^+| = |I^-| \tag{49}$$

ขั้นที่ 6: ต้นเหตุของ transient คือผลต่างของสนาม ขั้นที่ 6 ตอบคำถามว่า transient หลังสลับมาจากไหน เมื่อสเตตที่ขั้วต่อเนื่องและกระแสไม่กระโดด สิ่งที่**เปลี่ยน** คือสนามเวกเตอร์ ประเมินสนามของทั้งสองสาขาที่สเตตขวามือ**ตัวเดียวกัน** จะได้ผลต่างที่ไม่เป็นศูนย์

$$\Delta f = f_{m^+}(t_s, x^+, y, u) - f_{m^-}(t_s, x^+, y, u) \neq 0 \quad x(t_s{}^+) \text{ ต่อเนื่องที่ขั้ว} \tag{50}$$

ผลต่างนี้คือปริมาณที่ถูกอินทิเกรตต่อจากคอมมิท จึงเป็นคำอธิบายของ transient ทั้งหมดโดยไม่ต้องอ้างการกระโดดของสเตตเลย ค่าที่วัดได้ที่คอมมิทของ IBR2 คือ 448.93 ตอนขึ้นเป็น GFM และ 5.95 ตอนคืนเป็น GFL ตามตารางที่ 8 ความต่างของขนาดสองค่านี้อธิบายได้ตรงตัว: ตอนขึ้นเป็น GFM เกาะเพิ่งเสียเครื่องจักรไป สาขา VSG จึงเริ่มทำงานภายใต้ความไม่สมดุลกำลังทันที ส่วนตอนคืนเป็น GFL เครื่องจักรกลับมาถือมุมอ้างอิงแล้ว

ขั้นที่ 7: การยกความถี่ ได้จากการแก้ย้อน ไม่ใช่การตั้งค่า ขั้นที่ 7 การยกค่าความถี่ข้ามโหมดไม่ใช่ค่าที่ตั้งขึ้น แต่ได้จากการแก้สมการความถี่ของ PLL ย้อนกลับ ที่จุดยึด $v_q = 0$ ตามขั้นที่ 3

ความถี่ของ PLL จึงขึ้นกับ ξ_{PLL} เพียงตัวเดียว การกำหนดให้ความถี่เท่ากับค่าก่อนสลับจึงให้ค่า ${\xi_{\mathrm{PLL}}}^{+}$ ที่โค้ดใช้พอดี

$$\omega_{\mathrm{pu}} = 1 + \frac{k_{p,PLL} v_q + k_{i,PLL}\xi_{\mathrm{PLL}}}{\omega_b} \overset{v_q=0}{\rightarrow} 1 + \frac{k_{i,PLL}\xi_{\mathrm{PLL}}}{\omega_b} \tag{51}$$

$$\mathrm{GFM} \rightarrow \mathrm{GFL}: \quad {\xi_{\mathrm{PLL}}}^{+} = \frac{\omega_b({\omega_{\mathrm{VSG}}}^{-} - 1)}{k_{i,PLL}}$$

$$\mathrm{GFL} \rightarrow \mathrm{GFM}: \quad {\omega_{\mathrm{VSG}}}^{+} = {\omega_{\mathrm{pu}}}^{-}$$

ตารางที่ 8 ค่าคงเหลือของทุกเอกลักษณ์ในการพิสูจน์

เอกลักษณ์ที่ตรวจ	GFL→GFM	GFM→GFL	**ขั้น**
แถว i_d, i_q เหลือเฉพาะ PI ชั้นใน	1.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}	1
${i_d}^{+}$ จากสองสาขาตรงกัน	0	0	3
${i_q}^{+}$ จากสองสาขาตรงกัน	0	0	3
$\theta^{+} = \angle V$ ทั้งสองสาขา	0	0	3
$e_{\mathrm{Vd}} = e_{\mathrm{Vq}} = 0$ ที่จุดยึด	0	—	3
$i^{*} = i$ ที่จุดยึด	0	0	3
แถว AC นิ่งที่จุดยึด	8.7×10^{-14}	8.7×10^{-14}	3
$\lvert I^{+} - I^{-}\rvert$ จากแผนที่ถ่ายโอน	0	0	4
การยกความถี่คืนค่าเดิม	0	0	7
$\lvert I^{+} - I^{-}\rvert$ ที่คอมมิทจริง	6.2×10^{-17}	2.8×10^{-17}	4
สเตตของสาขาที่หลับกระโดด	0	0	—
n_{act} ก่อน → หลัง	$10 \rightarrow 11$	$11 \rightarrow 10$	—
$\lVert \Delta f \rVert$ ที่ x^{+} เดียวกัน	448.93	5.95	6

8. ตัวกำกับอัตโนมัติและดัชนีความรุนแรง

Supervisor ใช้ค่าความเบี่ยงเบนแรงดันของ IBR และความถี่เฉลี่ยของระบบเพื่อสร้างสอง sub-indices

$$J_{V,i} = \frac{\lvert \lvert V_i \rvert - {V_i}^{\star} \rvert}{\Delta V_{\mathrm{base}}} \qquad J_f = \frac{\lvert f_{\mathrm{coi}} - f_0 \rvert}{\Delta f_{\mathrm{base}}} \tag{52}$$

และรวมเป็น severity index

$$S_i(t) = \mathrm{sat}_{[0,1]}\left(w_V J_{V,i} + w_f J_f\right) \qquad w_V + w_f = 1 \tag{53}$$

ใช้ hysteresis และ dwell เพื่อลดการ chatter

$$\mathrm{GFL} \rightarrow \mathrm{GFM}: \quad \exists\, i \in \mathcal{L}: S_i \geq \Gamma_{\mathrm{on}} \text{ ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า } T_{d,on} \tag{54}$$

$$\mathrm{GFM} \rightarrow \mathrm{GFL}: \quad \forall\, i \in \mathcal{L} \cup \mathcal{G}: S_i < \Gamma_{\mathrm{off}} \text{ ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า } T_{d,off} \tag{55}$$

เมื่อจำเป็นต้องเพิ่ม forming support ระบบไม่เลือกจากดัชนีเพียงอย่างเดียว แต่ค้นหา candidate ที่เป็น strict superset ของชุด GFM ปัจจุบันและผ่าน authenticated equilibrium/SSSA table โดยเริ่มจากจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มน้อยที่สุดก่อน หากต้องลด support จะเลือก strict nonempty subset ที่ยังรักษา reference ได้ในช่วง SG offline

ก่อน SG trip ยังมี reference-loss guard ตรวจว่า event จะทำให้ island ไม่มี SG/GFM หรือไม่ หากใช่ event จะถูก refuse ก่อนเรียก Newton ส่วน support transition ที่ผ่าน selector แล้วยังสามารถถูกตรวจด้วย short forward certificate เพื่อปฏิเสธ state ที่มี relative-angle separation หรือ nonlinear nonconvergence รุนแรง แม้ candidate นั้นจะผ่าน SSSA แล้วก็ตาม หลักการนี้เป็นเหตุผลที่ adaptive arm สามารถค่อย ๆ เพิ่ม GFM เป็นลำดับแทนการกระโดดไป configuration ใหญ่ทันที

เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 7 สมการของตัวกำกับไม่มีค่าคงตัวเขียนอยู่ในสมการ ตารางที่ 9 รวบรวมระดับกระตุ้น เวลาหน่วง ฐานของดัชนี และเกณฑ์เชิงตัวเลขทั้งหมดไว้ที่เดียว ทุกค่าถูกตรึงก่อนการประเมิน candidate

ตารางที่ 9 ระดับกระตุ้น เวลาหน่วง และเกณฑ์ของตัวกำกับอัตโนมัติ

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่า
$\Gamma_{\mathrm{on}}, \Gamma_{\mathrm{off}}$	ระดับกระตุ้นเข้าสู่ GFM และระดับปลดกลับสู่ GFL	0.65, 0.35
$T_{d,on}, T_{d,off}$	เวลาหน่วงคงสถานะขาเข้าและขาออก	0.10, 1.00 s
ΔV_{base}, Δf_{base}	ฐานของดัชนีย่อยแรงดันและความถี่	0.10 pu, 0.50 Hz
w_V, w_f	น้ำหนักของดัชนีย่อยทั้งสอง	0.5, 0.5
$T_{\mathrm{hold}}, T_{\mathrm{lock}}$	เวลาถือสถานะขั้นต่ำหลังเหตุการณ์ และเวลาล็อกหลังคอมมิท	1.0, 2.0 s
$\Delta V^{\max}$, $\Delta f^{\max}$, $\Delta\theta^{\max}$	ผลต่างแรงดัน ความเร็วต่อหน่วย และมุมเฟสสูงสุดที่ยอมให้ปิดเบรกเกอร์	0.05 pu, 0.001 pu, 10°
T_{dwell}, $T_{\mathrm{off}}{}^{\min}$	เวลายืนยัน synchronism และเวลาปลดขั้นต่ำก่อนปิดเบรกเกอร์	0.5, 0.5 s
$\zeta_{\min}$	พื้น damping ratio ของเกณฑ์คัดกรอง candidate	0.05
$\varepsilon_{\mathrm{KCL}}, \varepsilon_N$	เกณฑ์ residual ของ KCL ที่ลิมิตขวา และของ Newton ในแต่ละขั้นเวลา	10^{-6}, 10^{-8}
β	ความกว้างแถบ blend ของ anti-windup (0 = สวิตช์แข็ง)	0 หรือ 10^{-3}

9. การตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับโปรแกรมอ้างอิงภายนอก

การตรวจสอบความถูกต้องของสายงานคำนวณใช้การเปรียบเทียบกับโปรแกรมอ้างอิงภายนอกบนข้อมูลนำเข้าชุดเดียวกัน โดยโปรแกรมอ้างอิงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบเท่านั้น ไม่มีค่าใดจากโปรแกรมเหล่านั้นไหลกลับเข้าสู่การคำนวณของโครงงาน เกณฑ์ยอมรับทุกตัวถูกประกาศไว้ก่อนดูผล

โปรแกรมอ้างอิงหลักคือ PSAT รุ่น 2.1.11 [7] ซึ่งใช้ตัวแก้ Newton สำหรับ PF และวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูที่มี corrector ลู่เข้าสำหรับโดเมนเวลา ซึ่งเป็นโปรแกรมเสถียรภาพแบบคลาสสิกอันดับสอง ผลการเปรียบเทียบสามทางแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบผล PF และผลโดเมนเวลากับ PSAT บนข้อมูลนำเข้าชุดเดียวกัน

ปริมาณที่เทียบ	IEEE 14-bus	IEEE RTS-24	เกณฑ์ที่ประกาศก่อน
$\max\|\Delta\|V\|\|$ (pu)	6.661×10^{-16}	4.441×10^{-16}	$<10^{-6}$
$\max\|\Delta\theta\|$ (deg)	3.553×10^{-14}	6.750×10^{-14}	$<10^{-4}$
$\max\|\Delta Y_{\text{net}}\|$	3.972×10^{-15}	2.842×10^{-14}	ต้องเป็นเครือข่ายเดียวกัน
$\Delta\delta_{\text{COI}}$ (deg)	0.0096	0.0068	<0.05
$\Delta\omega$ (pu)	3.816×10^{-6}	4.620×10^{-6}	$<10^{-4}$
ΔP_e (MW)	0.0422	0.0827	<0.1
$\max\|\Delta\|V\|\|$ ระหว่างเกิด fault (pu)	3.179×10^{-5}	5.354×10^{-6}	$<10^{-3}$

ผลสำคัญ ผล PF ตรงกับ PSAT ที่ระดับความละเอียดของเครื่อง และผลโดเมนเวลาผ่านทุกเกณฑ์ที่ประกาศไว้ก่อน โดยไม่มีการปรับพารามิเตอร์ ตัวแก้ หรือค่า tolerance ใดเพื่อให้ผลตรงกัน

การตรวจสอบ SSSA ใช้แนวทางยึดสัญญาของสมการ ไม่ใช้ค่าจากวรรณกรรมเป็นเป้าหมายการยอมรับ

residual ของ equilibrium ทุกกรณีต่ำกว่า 10^{-10} การประกอบคืน Schur complement ให้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์พอดี และการศึกษาการลู่เข้าของ Jacobian แบบผลต่างจำกัดให้ที่ราบ (plateau) ระหว่างขั้น $h = 10^{-5}$ และ 10^{-6} ที่ระดับ 1.686×10^{-7}, 5.799×10^{-9} และ 1.078×10^{-7} สำหรับสามแบบจำลองที่ตรวจ ทั้งหมดต่ำกว่าเกณฑ์ที่ประกาศไว้ก่อนคือ 10^{-3} หลายอันดับ ขั้นผลต่างจำกัดที่ใช้ในการผลิตจึงอยู่บนที่ราบนี้ ไม่ได้ถูกเลือกเพื่อให้ค่า eigenvalue ดูดี

การเทียบกับตารางที่ 9.5 ของ Padiyar [3] เป็นการตรวจสอบเชิงวินิจฉัยเท่านั้น ไม่ใช่เกณฑ์ยอมรับ ระยะห่างสูงสุดของคู่ eigenvalue ที่จับคู่กันได้ประมาณ 4.3×10^{-2} เนื่องจากการศึกษาที่ราบข้างต้นแสดงว่า eigenvalue เปลี่ยนเพียงระดับ 10^{-7} เมื่อเปลี่ยนขั้นผลต่างจำกัด ความต่าง 4×10^{-2} นี้จึงอธิบายด้วยสัญญาณรบกวนไม่ได้ สาเหตุยังไม่ได้ข้อสรุป และอาจมาจากความต่างของแบบจำลอง ข้อมูล convention ของสัญลักษณ์ การกำหนดค่าเริ่มต้น หรือความละเอียดของค่าที่ตีพิมพ์ ไม่มีพารามิเตอร์ ค่าคงตัวเวลา แบบจำลองโหลด ขั้นผลต่างจำกัด หรือ tolerance ใดถูกปรับเพื่อลดความต่างนี้

10. การทดสอบแบบจำลอง IBR บนระบบ SMIB

ก่อนนำ IBR ไปประกอบในระบบ IEEE 14-bus แบบจำลองแต่ละโหมดถูกทดสอบแยกบนระบบ single-machine infinite-bus (SMIB) ซึ่งมีคำตอบวงจรอนุกรมในรูปปิดใช้เทียบได้ จุดทำงานที่ใช้คือแรงดันปลายทาง $V = 1.0\angle 0°$ pu, $P = 0.40$ pu, $Q = 0.10$ pu และอิมพีแดนซ์สายส่ง $Z_{line} = 0.02 + j0.20$ pu บนฐาน 100 MVA โดยกรณี GFL และกรณี GFM เป็นสองกรณีแยกกัน ไม่ได้ทำงานพร้อมกันในระบบเดียว

ตารางที่ 11 ผลการตรวจสอบแบบจำลอง IBR บนระบบ SMIB (สองกรณีแยกกัน)

ปริมาณที่ตรวจ	GFL (10 state)	GFM (4 state)
residual ของสมการเชิงอนุพันธ์ $\|f_0\|$	2.790×10^{-13}	6.523×10^{-14}
residual ของ KCL ที่ equilibrium $\|g_0\|$	1.110×10^{-16}	2.082×10^{-16}
$\text{rcond}(g_y)$	0.8347	0.9216
ความคลาดเคลื่อนการประกอบคืน Schur	2.605×10^{-14}	8.095×10^{-11}
$\max\Re\{\lambda\}$ (s^{-1})	-11.23383	-0.554663
ความคลาดเคลื่อนเอกลักษณ์กำลัง (pu)	0.000	6.523×10^{-16}

ปริมาณที่ตรวจ	GFL (10 state)	GFM (4 state)
ความต่างระหว่างผลไม่เชิงเส้นกับเชิงเส้น	7.700×10^{-6}	2.866×10^{-5}
อัตราส่วนเมื่อลดขนาดการรบกวนครึ่งหนึ่ง	2.489×10^{-9}	1.433×10^{-5}

ผลที่ต้องอ่านเป็นสาระเชิงกายภาพคือ GFM แบบไม่มี PLL ให้คู่ mode แกว่งของ VSG ที่ $\lambda = -0.5555 \pm j9.356$ s^{-1} ซึ่งเท่ากับ $f_m = 1.489$ Hz และ $\zeta = 0.05926$ ตรงกับที่ทฤษฎีของสมการแกว่งคาดไว้ว่าโครงสร้างนี้ต้องมี mode แกว่ง ในขณะที่ GFL ให้เฉพาะรากจริงที่เร็วกว่าและไม่มีสมการแกว่งของตนเอง ความคลาดเคลื่อนเอกลักษณ์กำลังของ GFL เท่ากับศูนย์พอดีเทียบกับเกณฑ์ 10^{-10} ที่ประกาศไว้ก่อน ซึ่งยืนยันว่ากำลังที่คำนวณจาก state ภายในและกำลังที่คำนวณจากพอร์ตปลายทางเป็นปริมาณเดียวกัน ไม่ใช่สองการคำนวณที่ให้ค่าใกล้เคียงกัน

11. วิธีตรวจสอบและหลักฐานที่ใช้ยืนยันแบบจำลอง

โครงงานใช้แนวทาง “สมการเดียวกัน–หลายการตรวจสอบ” คือไม่สร้าง simplified model แยกขึ้นมาเพื่อทำให้ผล validation ผ่าน ตารางที่ 12 สรุปสิ่งที่ตรวจและเหตุผลของแต่ละ gate โดยผลทั้งหมดในรายงานนี้อ้างเฉพาะกรณี IEEE 14-bus และแบบจำลองที่ประกอบอยู่ในกรณีดังกล่าว

ตารางที่ 12 สรุปการตรวจสอบที่ใช้กับกรอบ IEEE 14-bus

ส่วนที่ตรวจ	วิธีตรวจ	เกณฑ์/หลักฐานสำคัญ
PF	Newton mismatch, bus/branch power balance	operating point ต้องลู่เข้าและกำลังที่คำนวณกลับจาก V, I ต้องสอดคล้อง
DAE equilibrium	แก้ $f = 0$ พร้อม KCL ทุกแถว	ไม่ตัด physical KCL ของ REF bus; state และ input ชุดนี้ถูก reuse ใน SSSA/TS
SSSA	linearize full-KCL DAE และจัดการ gauge ก่อน eig	physical eigenvalues finite; candidate ต้องมี damping margin ตามเกณฑ์ที่ freeze ไว้
IBR model	equilibrium residual, mode ownership, frame covariance	GFM branch ไม่มี PLL; GFL PLL ต้องตอบสนองต่อ v_q; inactive state ต้อง hold
DC source	equilibrium, stable DC pair, capacitance sensitivity	V_{dc}, I_{dc} เป็น equilibrium ที่ dispatch และคู่ DC eigenvalue อยู่ left-half plane
Mode transfer	คำนวณ terminal port ก่อน/หลัง	$\lvert I^+ - I^- \rvert \leq 10^{-10}$ และ P, Q, V_{dc}, I_{dc} ต่อเนื่องตาม contract
TS solver	implicit residual + rejected-step rollback	accepted residual ต่ำกว่า 10^{-8}; rejected trial ไม่ถูกบันทึกเป็น trajectory
Event handling	exact event landing + right-limit solve	ไม่ให้ time step คร่อม topology/mode สองชุด
Supervisor	reference guard + authenticated candidate + certificate	ไม่มีช่วง energized island ที่ไร้ voltage-forming source และไม่ commit candidate ที่ nonlinear trial ไม่ผ่าน
Regression	fixed default เทียบ explicit fixed บน IEEE14	t, x, y, u และ event log ตรงกันแบบ bit-identical

12. เหตุการณ์ทดสอบและผลการจำลองในโดเมนเวลา

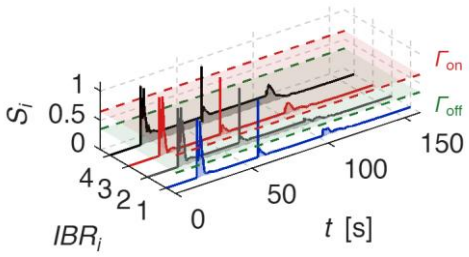
หัวข้อนี้เป็นกรณีศึกษาบนขอบเขตเวลา 160 วินาที ที่รวมทั้งรอบไว้ในวิถีเดียว คือปลด SG ให้คอนเวอร์เตอร์รับมุมอ้างอิงแทน เกิดฟอลต์แบบ bolted ที่บัส 9 แล้วคืน SG option ของการรันประกาศการปรับเรียบ anti-windup ที่ $\beta = 10^{-3}$ ตามตารางที่ 9 ซึ่งเป็นการปรับเรียบเชิงตัวเลขที่ประกาศไว้ ไม่ใช่การเปลี่ยนกฎการควบคุม และไม่มีเกณฑ์การยอมรับใดถูกผ่อน

ตารางที่ 13 ผลที่วัดได้ของกรณีศึกษา 160 วินาที ทุกค่าอ่านจากแคชของการรัน

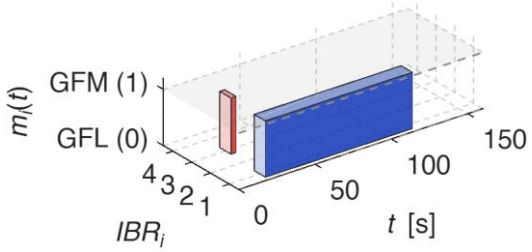
รายการ	ค่าที่วัดได้	รายการ	ค่าที่วัดได้
ขอบเขตเวลาที่เดินถึง	160.000000 s	จุดตัวอย่างที่ยอมรับ	2288
ขั้นเวลาที่ถูกปฏิเสธ	80	ขั้นที่ยอมรับด้วยพื้นขั้นต่ำ	0
เวลาปิดเบรกเกอร์ SG	102.362690 s	เวลาคืนมุมอ้างอิงให้ SG	116.237900 s
GFM สูงสุดพร้อมกัน	2	GFM เมื่อจบการรัน	0
commit เพิ่ม GFM / ปฏิเสธ	1 / 0	commit ปลด GFM / ปฏิเสธ	1 / 0
ความถี่เฉลี่ยเมื่อจบการรัน	59.999958 Hz	แรงดันบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อจบ	0.966733–1.057534 pu
ความถี่เฉลี่ยนอกหน้าต่างฟอลต์	59.240121–60.114155 Hz	ยอดขณะฟอลต์	60.676026 Hz
แรงดันนอกหน้าต่างฟอลต์	0.550775–1.137835 pu	ยอดขณะฟอลต์	0.258035–1.863839 pu

หนึ่งขอบเขตเวลา 160 วินาที: ปลด SG, คอนเวอร์เตอร์รับมุมอ้างอิง, ฟอลต์แบบ bolted ที่บัส 9, แล้วคืน SG คำถามของชุดนี้ต่อกันสามข้อบนวิถีเดียว ข้อแรกคือเมื่อเครื่องจักรออกจากระบบมีคอนเวอร์เตอร์รับมุมอ้างอิงของเกาะหรือไม่ ข้อที่สองคือเกาะที่ไม่มีเครื่องจักรทนฟอลต์แบบ bolted ได้หรือไม่ และข้อที่สามคือเครื่องจักรกลับเข้าระบบและรับมุมอ้างอิงคืนได้หรือไม่ ลำดับเหตุการณ์คือปลด SG ที่ 20 วินาที ฟอลต์ที่บัส 9 เมื่อ 60 วินาที เคลียร์ที่ 60.15 วินาที และเสนอคืน SG ที่ 100 วินาที เหตุการณ์ที่กำหนดไว้ทั้งสี่รายการถูกกระทำจริง

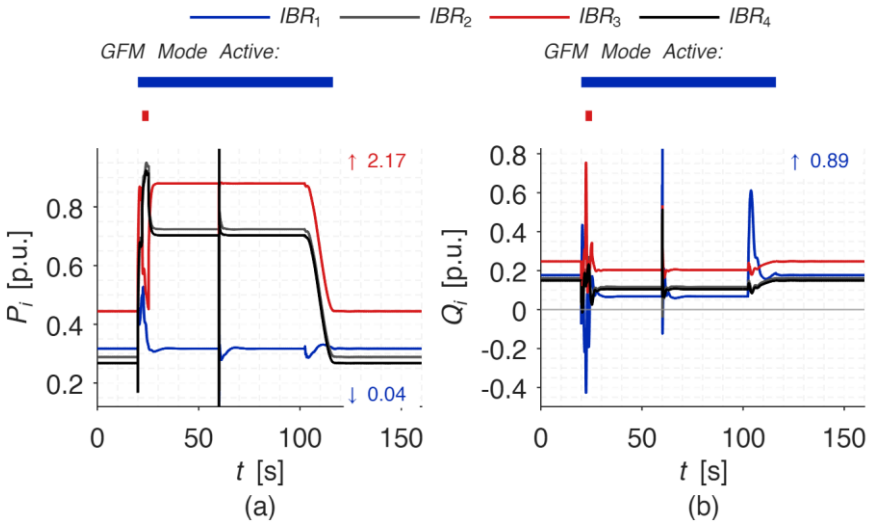
สิ่งที่วัดได้ ที่ 20 วินาที IBR2 เปลี่ยนเป็น GFM ในก้าวเดียวกับที่เบรกเกอร์ของ SG เปิด และถือมุมอ้างอิงของเกาะไว้ ที่ 22.089 วินาที ตัวกำกับเพิ่ม IBR6 ขึ้นเป็น GFM อีกตัว แล้วปลดกลับสู่ GFL ที่ 25.303 วินาที ฟอลต์ที่ 60 วินาทีจึงมาถึงเกาะที่มีตัวสร้างแรงดันหนึ่งตัว และเกาะทนได้จนถึงการเคลียร์ เบรกเกอร์ของ SG ปิดที่ 102.362690 วินาที ช้ากว่าที่เสนอไว้ 2.36 วินาที เพราะเวลาในตารางเหตุการณ์เป็นเวลาที่เร็วที่สุดที่อนุญาตให้เริ่มตรวจ ไม่ใช่เวลาปิด และที่ 116.237900 วินาที IBR2 คืนสู่ GFL พร้อมคืนมุมอ้างอิงให้ SG ค่าขณะฟอลต์ต้องอ่านแยกจากค่าใช้งาน: ยอด 60.676026 Hz และ 1.863839 pu เป็นช่วงสั้นระดับมิลลิวินาทีของลิมิตขวาในธุรกรรมเคลียร์ฟอลต์ ไม่ใช่พิกัดใช้งาน รูปจึงตั้งกรอบแกนจากแถบใช้งานและกำกับค่ายอดไว้ที่ขอบกรอบ โดยไม่มีจุดตัวอย่างใดถูกตัด กรอง ปรับเรียบ หรือสุ่มใหม่



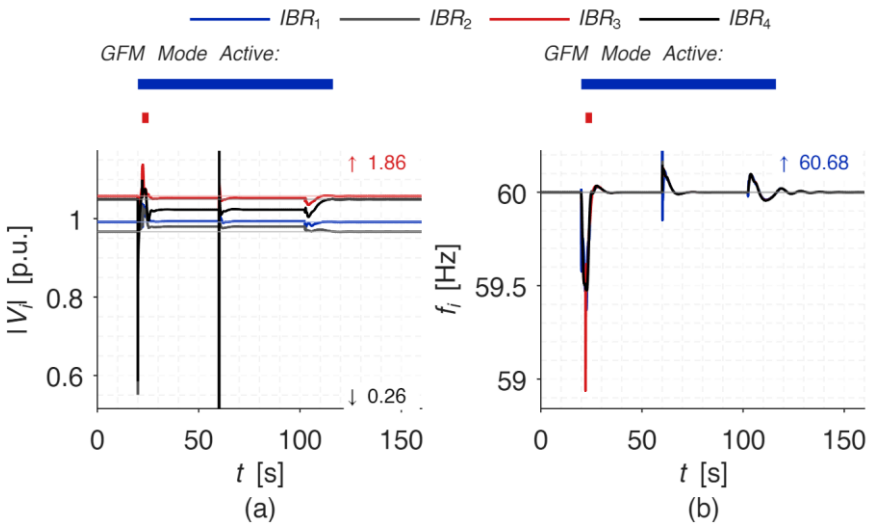
รูปที่ 4 ดัชนีการสลับของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่ พร้อมระนาบตัดสินใจสองระดับ



รูปที่ 5 รโหมด GFL/GFM ของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่ ตลอดขอบเขตเวลา



รูปที่ 6 กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟต่อคอนเวอร์เตอร์ ใต้แถบช่วงที่โหมด GFM ทำงาน



รูปที่ 7 ขนาดแรงดันของบัสคอนเวอร์เตอร์ และ ความถี่ของคอนเวอร์เตอร์เอง ใต้แถบช่วงที่โหมด GFM ทำงาน

13. การเปรียบเทียบการควบคุมและสิ่งที่สรุปได้จากผล

เพื่อแยกผลของ การสลับโหมดตามสภาวะ ออกจากผลของการตรึงโหมดไว้ รายงานเทียบสองแขนงบนเครือข่าย ชุดจ่ายโหลด ตารางเหตุการณ์ ตัวแก้สมการ และตัวควบคุมขั้นเวลาชุดเดียวกัน ความต่างเพียงอย่างเดียวคือการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ ความต่างของผลจึงอธิบายได้ด้วยนโยบายเท่านั้น ตัวเลขที่ยืนยันเงื่อนไขนี้คือที่จุดเวลาร่วมกันทุกจุดในช่วง $[0,20)$ วินาที ขนาดแรงดันของทุกบัสตรงกันภายใน 4.9×10^{-14} pu ข้อที่ต้องระบุไว้คู่กันคือแขนงตรึง GFL รันได้เฉพาะเมื่อระงับเกตป้องกันการสูญเสียมุมอ้างอิงและตรึงมุมอ้างอิงไว้ที่บัส 1 ซึ่งเป็นการเปิดทางเชิงวินิจฉัยสองข้อ แขนงนั้นจึงเป็นชั้น ASSUMED_DIAGNOSTIC ใช้สนับสนุนได้เพียงข้อความเชิงเปรียบเทียบ ไม่ใช่ข้ออ้างเรื่องความพร้อมใช้งาน ส่วนการปฏิเสธของโค้ดการผลิตเมื่อเกาะไม่มีแหล่งสร้างแรงดันไม่ถูกแก้ไข

ผลนี้ให้ข้อสรุปสองประการ ประการแรก หลังสูญเสีย SG ระบบต้องมีแหล่ง voltage-forming อย่างน้อยหนึ่งตัว มิฉะนั้นไม่มีมุมอ้างอิงและสมการไม่ควรถูกแก้ต่อ ข้อนี้เห็นได้จากการที่แขนงตรึง GFL ต้องระงับเกตป้องกันการสูญเสียมุมอ้างอิงจึงจะรันผ่าน 20 วินาทีไปได้ ประการที่สอง ประโยชน์ของนโยบายสลับมาจากลำดับของการเปลี่ยนโหมด ที่เพิ่ม support ทีละขั้นและตรวจก่อน commit ทุกครั้ง ไม่ใช่เพียงชุด GFM สุดท้าย ดังที่กรณีศึกษานี้บันทึกไว้ว่า IBR2 ขึ้นเป็น GFM ที่ 20 วินาที ตัวกำกับเพิ่ม IBR6 เป็นตัวที่สองที่ 22.089 วินาที แล้วปลดกลับเหลือตัวเดียวที่ 25.303 วินาที จำนวน GFM จึงเป็นผลของดัชนีความรุนแรงกับเวลาหน่วงคงสถานะ ไม่ได้ถูกผูกกับเวลาเหตุการณ์ไว้ล่วงหน้า

13.1 สมรรถนะที่บัส 9 ระหว่างการสลับโหมดและการตรึง GFL

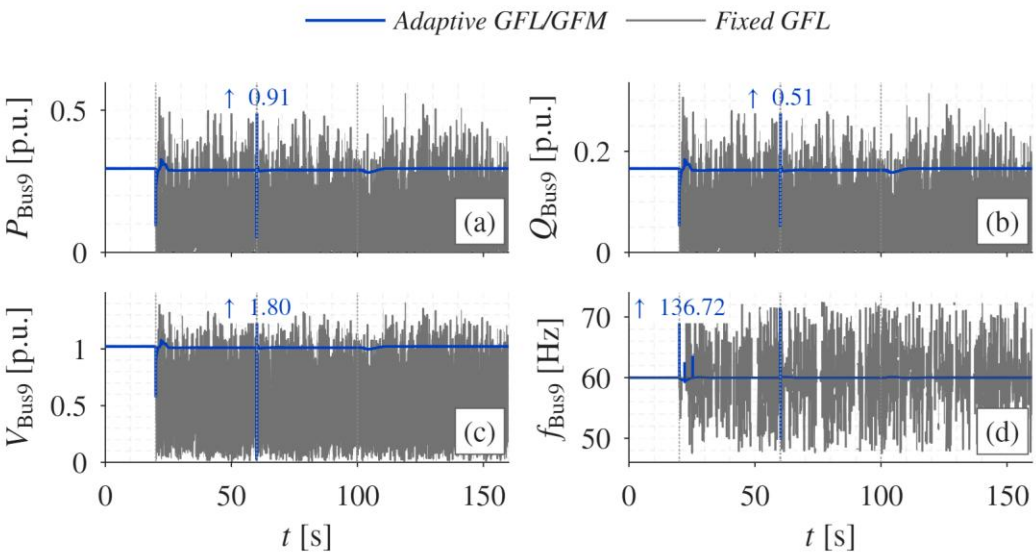
รูปที่ 8 เปรียบเทียบสองโหมดที่ บัส 9 ซึ่งเป็นบัสที่เกิด fault

$$S_{\mathrm{Bus9}}(t) = |V_9(t)|^2\, y_9^{\mathrm{eff}}(t), \qquad y_9^{\mathrm{eff}}(t) = m(t)\, y_9 + \frac{\chi_f(t)}{Z_f}, \tag{56}$$

โดย $y_9 = S_9{}^{\mathrm{pf}} / \left|V_9{}^{\mathrm{pf}}\right|^2$ คือแอดมิตแตนซ์ของโหลดที่จุดทำงาน PF และ χ_f เป็นฟังก์ชันบ่งชี้ที่มีค่า 1 เฉพาะช่วงที่เครือข่ายอยู่ในสถานะ fault พจน์ χ_f/Z_f จึงคือแอดมิตแตนซ์ของ fault ที่ประทับลงบัสเดียวกัน ลำดับเหตุการณ์ชุดนี้ไม่มีการเพิ่มโหลด ตัวคูณ $m(t) = 1$ จึงคงค่าตลอดการรัน และหน้าต่าง $60.000–60.150$ วินาที รวมกระแส fault ไว้ตามที่เกิดขึ้นจริง เกตที่ยืนยันสมการนี้อยู่ที่ $t = 0$ คือค่าที่คำนวณย้อนได้ต้องเท่ากับข้อมูลโหลดของกรณีศึกษาและแรงดัน PF ภายใน

10^{-9} pu ซึ่งได้ $P = 0.295000$ pu, $Q = 0.166000$ pu และ $|V_9| = 1.021934$ pu ตรงทุกหลัก ทั้งสองแขนง

แผงที่ (d) เป็นความถี่ที่บัส 9 เอง $f_9(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi}\frac{d\theta_9}{dt}$ จากมุมแรงดันของบัสนั้นซึ่งเป็นตัวแปรพีชคณิตที่รันแก้ได้ ไม่ใช่ความถี่เฉลี่ยถ่วงด้วยโมเมนต์ความเฉื่อย เพราะบัส 9 ไม่มีอุปกรณ์ต่ออยู่ จึงไม่มีความถี่เป็น state ที่บัสนั้น การคิดจากมุมบัสเดียวกันทำให้แผงนี้เทียบกันได้บนปริมาณเดียวกันทั้งสองแขนง เส้นของแขนงตรึง GFL ขาดเป็นช่วง ไม่ใช่เพราะข้อมูลขาด แต่เพราะกริดขาออก 20 ms ของแขนงนั้นแยกไม่ออกว่าฟลีตขยับมุมบัสเร็วแค่ไหน ก้าวที่ $|\Delta\theta|$ ถึง $\pi/2$ จึงไม่วาดเพราะเกินกว่าที่ความชันชีแคนต์บนก้าวนั้นจะแสดงได้



รูปที่ 8 (a) P_{Bus9} (b) Q_{Bus9} (c) V_{Bus9} (d) ความถี่ที่บัส 9 f_{Bus9}

ในช่วงที่ระบบเป็นเกาะ (20–100 วินาที ไม่นับหน้าต่างฟอลต์) นโยบายสลับโหมดยืนแรงดันบัส 9 ไว้ในแถบ 0.5741–1.0747 pu โดยขอบล่างเป็นลิมิตขวาที่ $t = 20$ วินาทีพอดี ซึ่งเป็นก้าวที่เครื่องจักรถูกปลด จากนั้นเข้าที่ $|V_9| = 1.0119$–1.0124 pu ตลอดช่วง 70–100 วินาที และส่งกำลังถึงโหลด $P = 0.2892$–0.2895 pu กับ $Q = 0.1628$–0.1629 pu ส่วนแขนงตรึง GFL ไม่เข้าที่ในช่วงเดียวกันเลย แต่แกว่งระหว่างจุดต่ำสุดที่ $t = 90.95$ วินาที ($|V_9| = 0.0074$ pu, $P = 0.0000$ pu, $Q = 0.0000$ pu) กับจุดสูงสุดที่ $t = 45.66$ วินาที ($|V_9| = 1.4112$ pu, $P = 0.5625$ pu, $Q = 0.3165$ pu) โดยแต่ละจุดอ่านจากจุดตัวอย่างเดียวกันทุกช่อง กำลังที่โหลดได้จึงแกว่งตามแรงดัน เพราะสมการที่ 56 ให้กำลังเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของแรงดัน

ความต่างที่ชี้ขาดอยู่ที่เบรกเกอร์ของเครื่องจักร ในแขนงสลับโหมด เกตซิงโครนิซึมผ่านและเบรกเกอร์ปิดที่ 102.362690 วินาที แล้วคืนมุมอ้างอิงให้เครื่องจักรครบที่ 116.237915 วินาที (สถานะ SUCCESS และ C1 COMPLETE ตามลำดับ) หลังจากนั้นบัส 9 เข้าที่ $|V_9| = 1.0189$–1.0225 pu และจบขอบเขตเวลาที่ $|V_9| = 1.0219$ pu, $P = 0.2950$ pu, $Q = 0.1660$ pu ซึ่งกลับมาที่จุดทำงาน PF ส่วนแขนงตรึง GFL ไม่เคยผ่านเกตนี้ จากการสำรวจ 1002 จุดในหน้าต่าง 100–120 วินาที มีจุดที่ผ่านเงื่อนไข 0 จุด และเกตที่จำกัดคือมุมเฟสทุกจุด โดย $\Delta\theta$ อยู่ในช่วง 74.4–105.6 องศา เทียบขอบ $\Delta\theta^{\max}$ ในตารางที่ 9 จึงได้สถานะ SYNC TIMEOUT และ NOT STARTED เครื่องจักรไม่กลับเข้าระบบ แขนงนั้นจึงแกว่งต่อจนจบขอบเขตเวลา และจบที่ $|V_9| = 0.5611$ pu, $P = 0.0889$ pu, $Q = 0.0500$ pu ห่างจากจุดทำงาน PF

ความถี่ที่บัส 9 ในช่วงเกาะของแขนงสลับโหมดอยู่ในแถบ 59.27–63.62 Hz ส่วนแขนงตรึง GFL อยู่ในแถบ 47.58–72.50 Hz ซึ่งกว้างกว่าหลายเท่า เทียบจากกราฟได้ตรงตัวว่าแขนงสลับโหมดยืน

ทั้งแรงดัน กำลัง และความถี่ที่โหลดบัสได้ดีกว่า สิ่งที่รูปนี้อ้างจึงครอบคลุมแรงดันและกำลังที่บัส 9 ความถี่ที่บัส 9 กับผลของเกตซิงโครนิซึม

14. สรุปผลงานที่พัฒนาได้จริงในโครงงาน

จากการดำเนินงานสามารถสรุปสิ่งที่พัฒนาและทดสอบได้ดังนี้

1. พัฒนา PF ของ IEEE 14-bus พร้อมการส่งต่อผลไปสร้าง DAE equilibrium ด้วย convention และ per-unit base ชุดเดียวกันตลอดสายงาน
2. พัฒนา SSSA บนระบบ DAE ประกบที่คง KCL ทุกแถว พร้อมลดรูปด้วย Schur complement การจัดการมุมอ้างอิง และการแจงนับชุด candidate ของ GFM ครบทั้ง 15 ชุด
3. พัฒนาการจำลองโดเมนเวลาแบบสี่เหลี่ยมคางหมูอิมพลิซิตที่รองรับการแก้ Newton แบบไม่เชิงเส้น การปรับขั้นเวลาอัตโนมัติ การย้อนกลับขั้นที่ถูกปฏิเสธ และการลงจุดเหตุการณ์อย่างแม่นยำ
4. รวม SG และ IBR หลายตัวไว้ในระบบ DAE ประกบชุดเดียว โดยอุปกรณ์ทุกตัวส่งกระแสอัดผ่านอินเทอร์เฟซเดียวกัน
5. พัฒนาแบบจำลอง IBR สองโหมดขนาด 17 state ที่มีภาคกำลัง AC/DC ร่วมกัน สาขา GFL ใช้ PLL และสาขา GFM ใช้ VSG พร้อม current limiter และ anti-windup
6. พัฒนาแผนที่ถ่ายโอนระหว่างสองโหมดที่รักษากระแสปลายทาง กำลัง P/Q, V_{dc} และ I_{dc} ภายในค่าคลาดเคลื่อนที่ประกาศไว้ก่อนคอมมิท
7. พัฒนาตัวกำกับอัตโนมัติที่ใช้ดัชนีความรุนแรงของแรงดันและความถี่ ฮิสเทอรีซิส เวลาหน่วงคงสถานะ การป้องกันการสูญเสียมุมอ้างอิง ตารางชุด candidate ที่ผ่านการรับรอง และใบรับรองการเปลี่ยนผ่านแบบไม่เชิงเส้น
8. ทดสอบแบบครบวงจรบน IEEE 14-bus ด้วยการปลด SG การส่งมุมอ้างอิงให้คอนเวอร์เตอร์ ฟอลต์แบบ bolted ที่บัส 9 และการคืน SG จนวิถีของนโยบายสลับเดินครบ 160 วินาที และคืนระบบกลับสู่สภาพ GFL ทั้งหมดหลังปิดเบรกเกอร์

15. ข้อจำกัดของผลและสิ่งที่ยังไม่อ้าง

เพื่อให้ผลในรายงานนี้ถูกนำไปใช้ต่อได้อย่างถูกต้อง หัวข้อนี้ระบุขอบเขตของข้ออ้างอย่างชัดเจน สิ่งที่ พิสูจน์แล้ว คือกรอบการทำงานเดินครบขอบเขตเวลา 160 วินาทีของกรณีศึกษา IEEE 14-bus ที่กำหนดไว้ พร้อมคืนมุมอ้างอิงกลับสู่ SG หลังเบรกเกอร์ปิด โดยทุกขั้นเวลาที่ยอมรับผ่านเกณฑ์ residual ที่ประกาศไว้ก่อน และผล PF กับผลโดเมนเวลาตรงกับโปรแกรมอ้างอิง PSAT ภายในเกณฑ์ที่ประกาศไว้ก่อน

สิ่งที่ ยังไม่อ้าง มีดังนี้ แบบจำลองเป็นแบบสมดุลสามเฟสในกรอบ RMS phasor จึงไม่ครอบคลุมพฤติกรรมแม่เหล็กไฟฟ้าที่เร็วกว่าขั้นเวลา phasor และกรณีไม่สมดุล รายงานนี้ ไม่ได้อ้าง ความสอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อ (grid code) ใด ๆ เนื่องจากยังไม่ได้จำลองระบบป้องกัน การทนแรงดันตก และข้อจำกัดพิกัดอุปกรณ์อย่างครบถ้วน ผลทั้งหมดผูกกับกรณีศึกษา ชุดจ่ายโหลด และตารางเหตุการณ์ชุดเดียว การขยายไปสู่ระบบขนาดใหญ่ยังไม่ได้ประเมิน ค่าจากตารางที่ 9.5 ของ Padiyar [3] ยังมีความต่างระดับ 4.3×10^{-2} ที่ยังไม่ได้ข้อสรุปเรื่องสาเหตุ และการเปรียบเทียบกับ PGAz ไม่ผ่านเกณฑ์และรายงานเป็น FAIL ตามจริง

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

ประโยชน์ด้านวิชาการและการพัฒนาแบบจำลอง

1. ได้กรอบการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้สมการและการส่งต่อ state ชุดเดียวกันตั้งแต่ PF, DAE equilibrium, SSSA จนถึง TS จึงตรวจสอบความสอดคล้องของผลระหว่างขั้นตอนได้โดยตรง
2. ได้แบบจำลอง IBR ที่สลับบทบาทระหว่าง GFL และ GFM ได้ภายในอุปกรณ์เดียว โดยรักษา state ทางกายภาพที่สำคัญไว้ครบเมื่อเปลี่ยนโหมด
3. ได้แนวทางการใช้การคัดกรองสัญญาณขนาดเล็กร่วมกับการยืนยันด้วยการจำลองไม่เชิงเส้น ซึ่งป้องกันการสรุปผลเกินขอบเขตจาก eigenvalue เพียงอย่างเดียว
4. ได้ชุดกรณีศึกษา IEEE 14-bus ที่มีเหตุการณ์รบกวนหลายชนิดบนขอบเขตเวลา 160 วินาที พร้อมชุดผลอ้างอิงที่ตรวจสอบแล้ว สำหรับใช้เป็นฐานเปรียบเทียบงานด้าน IBR ในอนาคต

ประโยชน์ด้านการประยุกต์ใช้งาน

1. แนวคิดตัวกำกับอัตโนมัติใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการจัดสรรบทบาท GFM เฉพาะช่วงที่ระบบต้องการ voltage-forming support แทนการกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ทุกตัวทำงานในโหมดเดียวตลอดเวลา
2. กรอบการทำงานช่วยศึกษาการถ่ายโอนผู้ถือมุมอ้างอิงระหว่าง SG และ IBR ในช่วงที่ระบบแยกเกาะและช่วงคืนระบบ ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบที่มีสัดส่วนอินเวอร์เตอร์สูง
3. ผลการเปรียบเทียบนโยบายแสดงการแลกเปลี่ยนระหว่างความมั่นคงของระบบ จำนวน IBR ที่ต้องทำหน้าที่ GFM และความซับซ้อนของการควบคุม ซึ่งเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเชิงวางแผน

ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น

1. หลังปลด SG ระบบไม่สามารถแก้สมการต่อได้หากไม่มี IBR อย่างน้อยหนึ่งตัวทำหน้าที่สร้างแรงดัน เนื่องจากไม่มีแหล่งกำหนดมุมอ้างอิงของโครงข่าย ปัญหานี้ไม่ใช่ปัญหาเชิงตัวเลขแต่เป็นข้อจำกัดเชิงกายภาพของระบบ
2. การสลับโหมดทำให้บทบาทของ controller state เปลี่ยนไป หากแผนที่ถ่ายโอน state ไม่ถูกต้องจะเกิดการกระโดดของกระแสที่จุดเชื่อมต่อ และทำให้ตัวแก้ Newton ในขั้นเวลาถัดไปไม่ลู่เข้า
3. ชุด candidate ที่ผ่านการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กไม่ได้รับประกันว่าวิถีไม่เชิงเส้นจะไปถึงได้ การคัดกรองเชิงเส้นจึงจำเป็นแต่ไม่เพียงพอ กรอบการทำงานนี้จึงไม่คอมมิทชุดใดด้วยผลการคัดกรองเพียงอย่างเดียว แต่ตรวจ residual ของลิมิตขวาบนแอดมิตแตนซ์ที่เป็นจริงในขณะนั้นก่อนคอมมิททุกครั้ง และย้อนธุรกรรมทั้งก้อนเมื่อไม่ผ่าน
4. การจำลองแบบอิมพลิซิตพร้อมการปรับขั้นเวลาอัตโนมัติใช้เวลาคำนวณสูง โดยเฉพาะช่วงเกิด fault และช่วงที่โครงสร้างเครือข่ายเปลี่ยน ซึ่งต้องแก้สมการไม่เชิงเส้นซ้ำหลายครั้งต่อหนึ่งขั้นเวลา
5. แบบจำลอง IBR ต้นทางให้สมการฝั่ง AC และตัวควบคุมไว้ครบ แต่ไม่ได้กำหนดกฎของแหล่งจ่ายฝั่ง DC หากปิดสมการด้วยแหล่งจ่ายอุดมคติ V_{dc} จะแทบไม่ตอบสนองและค่าคาปาซิแตนซ์ C_{dc} จะหายออกจากพลวัตทั้งหมด

แนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น

1. กำหนดการป้องกันการสูญเสียมุมอ้างอิง: ตรวจก่อนทุกครั้งว่าเกาะที่ยังจ่ายไฟมี SG หรือ GFM อย่างน้อยหนึ่งแหล่ง หากไม่มีให้ปฏิเสธเหตุการณ์นั้นแบบ fail-closed ก่อนเรียกตัวแก้สมการ
2. ใช้เวกเตอร์ state แบบ superset ขนาดคงที่ คง state ของภาคกำลังไว้ กำหนดค่าเริ่มต้นให้สาขาปลายทางจากพอร์ตปลายทางเดิม และตรวจความต่อเนื่องของกระแสก่อน commit
3. ใช้การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กเป็นเพียงการคัดกรองขั้นแรก และยืนยันชุดที่เลือกด้วยการจำลองไม่เชิงเส้นทุกครั้ง
4. ใช้ตัวแก้แบบสี่เหลี่ยมคางหมูอิมพลิซิตร่วมกับการควบคุมขั้นเวลา การลงจุดเหตุการณ์อย่างแม่นยำ และการย้อนกลับขั้นที่ถูกปฏิเสธ โดยไม่ต้องผ่อนเกณฑ์ใด
5. แทนการปิดสมการ DC แบบอุดมคติด้วยแหล่งจ่ายเทเวนินที่มีความต้านทานภายใน กระแสแหล่งจ่ายเป็น state และ chopper กันแรงดันเกิน พร้อมตรวจ equilibrium และตำแหน่ง eigenvalue ของคู่ DC ก่อนนำไปใช้จริง

โครงงานที่คาดว่าจะดำเนินการต่อไป

1. ขยายจากแบบจำลองสมดุลในกรอบ RMS phasor ไปสู่เครือข่ายไม่สมดุลและการวิเคราะห์ทรานเชียนต์เชิงแม่เหล็กไฟฟ้า พร้อมแบบจำลองระบบป้องกัน การจำกัดกระแสในสภาวะผิดพร่อง และการทนแรงดันตก เพื่ออ้างความสอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อได้ในอนาคต
2. ทดสอบกรอบการคัดเลือกชุด GFM บนระบบที่ใหญ่กว่า IEEE 14-bus และมีจำนวน IBR มากกว่าสี่ตัว เพื่อประเมินการขยายขนาดของการแจงนับชุด candidate ซึ่งเติบโตแบบเลขชี้กำลังตามจำนวนอุปกรณ์
3. พัฒนาเกณฑ์คัดเลือกชุด candidate ให้พิจารณาร่วมกันทั้ง damping ratio, การรองรับแรงดัน ระดับการใช้งานของคอนเวอร์เตอร์ พลังงานสำรอง และต้นทุนของการสลับโหมด แทนการใช้ damping margin เพียงตัวเดียว
4. เชื่อมต่อแบบจำลองกับการทดสอบแบบ hardware-in-the-loop หรือต้นแบบตัวควบคุม เพื่อทดสอบการสลับโหมดภายใต้ข้อจำกัดของระบบควบคุมจริง เช่น เวลาสุ่มสัญญาณและความหน่วงของการสื่อสาร

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.

[2] P. W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

[3] K. R. Padiyar, Power System Dynamics: Stability and Control, 2nd ed., Chapter 9, Section 9.6.1.

[4] IEEE Std 1110-2002, IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses.

[5] S. K. M. Kodsi and C. A. Cañizares, “Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers,” University of Waterloo Technical Report 2003-3, 2003.

[6] MATPOWER case case14, IEEE 14-bus test case converted from the IEEE Common Data Format, as distributed with the MATPOWER package.

[7] F. Milano, Power System Modelling and Scripting. Springer, 2010; PSAT version 2.1.11 time-domain simulation documentation.

[8] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications. Hoboken, NJ: Wiley/IEEE Press, 2010.

[9] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Chichester, UK: Wiley/IEEE Press, 2011.

[10] S. Bacha, I. Munteanu, and A. I. Bratcu, Power Electronic Converters Modeling and Control. London: Springer, 2014.

[11] N. Pogaku, M. Prodanović, and T. C. Green, “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 613–625, 2007.

[12] K. Sakimoto, Y. Miura, and T. Ise, “Virtual synchronous generator without phase locked loop based on current controlled inverter and its parameter design,” IEEJ Trans. Power and Energy, vol. 135, no. 7, pp. 462–470, 2015.

[13] G. Avila-Martinez et al., “Impact on transient stability of self-synchronisation control strategies in grid-forming VSC-based generators,” arXiv:2509.04388v1, 2025.

[14] National Renewable Energy Laboratory, REGFM_B1: An Electromagnetic Transient Model for Grid-Forming Inverters, NREL/TP-5D00-90260, 2024.

[15] G. Cui, Z. Chu, and F. Teng, “Control-mode as a grid service in software-defined power grids: GFL vs GFM,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 40, no. 1, pp. 314–326, Jan. 2025.

[16] H. Ding, R. Kar, Z. Miao, and L. Fan, “A novel design for switchable grid-following and grid-forming control,” IEEE Trans. Sustainable Energy, vol. 16, no. 2, pp. 1301–1314, Apr. 2025.