เอกสารสรุปวิชาโครงงาน

ชื่องานโครงงาน

(ภาษาไทย) กรอบการทำงานสำหรับการสลับโหมด Grid-Following/Grid-Forming แบบอัตโนมัติของ Inverter-Based Resources

(ภาษาอังกฤษ) An Automatic Following/Forming Framework for Inverter-Based Resources

สมาชิกผู้จัดทำ

1. Phichitchai Jueajan 66010569
2. Pakkapol Phadungdaen 66010612

อาจารย์ที่ปรึกษา

1. Dr. Tossaporn Surinkaew
2. Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2569

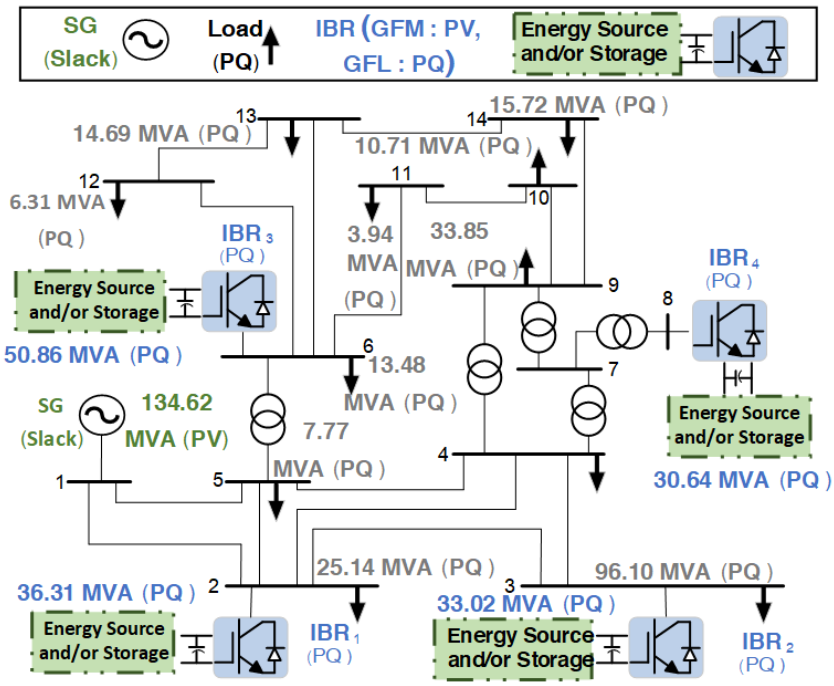
วัตถุประสงค์ของโครงงาน

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 อย่างไรก็ตาม การกำหนดให้ IBR ทุกตัวทำงานเป็น GFM ตลอดเวลาไม่จำเป็นต้องให้ผลดีที่สุด และอาจเพิ่มความซับซ้อนของการควบคุมหรือทำให้การจำลองไม่ผ่านในบางสภาวะ 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 ระบบจะไม่มีผู้ถือมุม

อ้างอิงและตัวแก้สมการจะต้องหยุดแบบ 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 ส่วนโครงสร้างและเกนของ IBR สองโหมดสืบจากงาน EECON49 [17] ซึ่งวงควบคุมกระแสและ PLL อ้างได้ถึง Yazdani และ Iravani [8] กับ Teodorescu และคณะ [9] วงกำลังชั้นนอกอ้างถึง Bacha และคณะ [10] และโครงสร้างเครื่องซิงโครนัสเสมือนแบบไม่มี PLL อ้างถึง Sakimoto และคณะ [12]

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 รูปผลตอบสนองทุกรูปในรายงานนี้วาดจากวิถีที่ตัวแก้สมการยอมรับแล้วของการรัน 250 วินาที ชุดเดียวกับที่ตารางทุกตารางอ้างถึง ทุกจุดที่พล็อตเป็นค่าดิบ ไม่มีการทำให้เรียบ กรอง ลดจำนวนจุด ตัดยอด เลื่อนระดับ แทรกค่า หรือเติมสัญญาณรบกวนสังเคราะห์ใด ๆ การกำหนดหน้าต่างแสดงผลเป็นการจำกัดช่วงแกนเท่านั้น ไม่มีจุดใดถูกแก้ค่าหรือถูกตัดออก

ตารางที่ 1 รวบรวมสัญลักษณ์หลักไว้ที่เดียวเพื่อให้ผู้อ่านย้อนกลับมาดูได้โดยไม่ต้องค้นทั้งเล่ม

ตารางที่ 1: สัญลักษณ์หลักที่ใช้ตลอดรายงาน

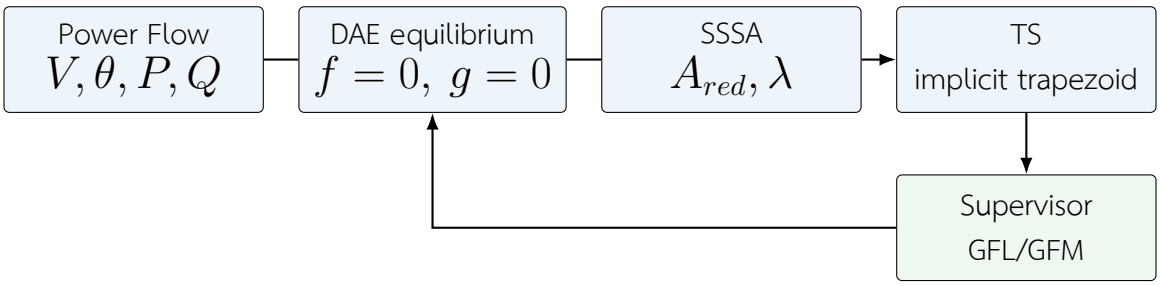
สัญลักษณ์	ความหมาย
Y_{net}, V	แอดมิตแตนซ์ของเครือข่าย และเวกเตอร์แรงดันบัสเชิงซ้อน
$I_{\text{bus}}(x, V)$	กระแสรวมที่อุปกรณ์ทุกตัวอัดเข้าบัส
x, y, u	differential state, algebraic variable, input และคำสั่ง
$S_{\text{base}}, f_0, \omega_b$	ฐานกำลังระบบ, ความถี่ฐาน, $\omega_b = 2\pi f_0$
κ	อัตราส่วนฐาน $S_{\text{base}}/M_{\text{base}}$ 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)
δ_{PLL}, ξ_{PLL}	มุม PLL และตัวอินทิเกรตของ PLL (มีเฉพาะ GFL)
$\delta_{VSG}, \omega_{VSG}, E$	มุม ความถี่ และแอมพลิจูดแรงดันของ VSG (มีเฉพาะ GFM)
$\Pi_I(\cdot; I_{max})$	ตัวจำกัดกระแสอ้างอิงแบบวงกลม

2. โครงสร้างระบบศึกษาและสายงาน PF–DAE–SSSA–TS

โครงงานพัฒนาสายงานคำนวณแบบต่อเนื่องโดยใช้ข้อมูลเครือข่าย จุดทำงาน และแบบจำลองอุปกรณ์ชุดเดียวกันตลอดทั้ง Power Flow (PF), DAE equilibrium, Small-Signal Stability Analysis (SSSA) และ Time-Domain Simulation (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: สายงานคำนวณหลักของโครงงาน ตั้งแต่ PF ถึงการสลับโหมดใน TS

3. Power Flow และการสร้าง operating point ของ IEEE 14-bus

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

ตารางที่ 2: ผล Power Flow ของบัสทั้งหมดในระบบ IEEE 14-bus ก่อนเกิด disturbance

Bus	Type	$\|V\|$ (pu)	θ (deg)
1	REF	1.0000	0.0000
2	GFL	0.9914	-3.2585
3	GFL	0.9667	-8.6921
4	PQ	0.9832	-6.7064
5	PQ	0.9858	-5.5221
6	GFL	1.0575	-6.7136
7	PQ	1.0253	-6.9205
8	GFL	1.0494	-4.4090
9	PQ	1.0219	-8.6416
10	PQ	1.0202	-8.5886
11	PQ	1.0347	-7.7782
12	PQ	1.0411	-7.6862
13	PQ	1.0342	-7.8345
14	PQ	1.0087	-9.3374

ผลสำคัญ: Power Flow ลู่เข้าโดยใช้บัส 1 เป็น REF; IBR อยู่ที่บัส 2, 3, 6 และ 8 และค่ากำลังฉีดของทุกอุปกรณ์ถูกส่งต่อไปสร้าง DAE equilibrium โดยไม่สร้าง operating point ชุดใหม่

การตรวจสอบผล Power Flow ไม่ได้ดูเพียงว่าตัวแก้รายงานว่าลู่เข้า แต่ตรวจสมดุลกำลังของทุกบัส การไหลและกำลังสูญเสียของทุกกิ่ง และค่ากระแสที่คำนวณย้อนกลับจาก $S = VI^*$ จากนั้นเมื่อแปลงผล Power Flow 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 Synchronous Generator

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 โดย state ที่เก็บคือ

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

และแกนกลใช้ swing equation

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

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

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

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

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

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 $-0.566771 \pm j2.132137\ \text{s}^{-1}$ 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

Mode	$\Re\{\lambda\}$	$\Im\{\lambda\}$	f (Hz)	ζ	Dominant state
30	-0.3280	± 0.4489	0.0714	0.5900	IBR2:ξ_{Vd}^{GFM}
29	-0.5668	± 2.1321	0.3393	0.2569	IBR3:δ_{PLL}^{GFL}
28	-0.5889	± 2.1717	0.3456	0.2617	IBR6:δ_{PLL}^{GFL}
27	-1.1855	± 2.9807	0.4744	0.3696	IBR2:ξ_{Vd}^{GFM}
10	-98.4062	± 98.3803	15.6577	0.7072	IBR2:I_{dc}
11	-96.4556	± 96.3252	15.3306	0.7076	IBR8:V_{dc}
12	-96.3465	± 96.2079	15.3120	0.7076	IBR3:V_{dc}
13	-95.5555	± 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

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

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

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

และรับ step เมื่อ residual ไม่เชิงเส้นผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ก่อน สำหรับผลหลักในรายงานนี้ ทุก 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 ที่ยอมรับแล้วก่อนลด h ใหม่ ดังนั้นวิถีที่นำไปพล็อตจึงไม่มี trial ที่ถูกปฏิเสธปะปนอยู่เลย

อีกจุดหนึ่งที่สำคัญคือการลงจุดเหตุการณ์อย่างแม่นยำ เมื่อมีการปลด SG เพิ่มโหลด เกิด fault เคลียร์ fault ปลดสายส่งหรือสลับโหมด 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 ที่ใช้ในกรณีหลักเป็นแบบจำลอง source-mapped จากโครงสร้าง EECON49 แล้วจัดให้อยู่ใน fixed-layout device เดียว เพื่อให้เปลี่ยนโหมดระหว่าง GFL และ GFM ได้โดยไม่เปลี่ยนขนาด state vector กลางการจำลอง แต่ละ IBR มี 17 coordinates และสามารถแบ่ง state ได้เป็นสามกลุ่ม

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

โดย

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

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

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

เมื่อนำทั้งสามกลุ่มมาเรียงใน fixed layout จะได้

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

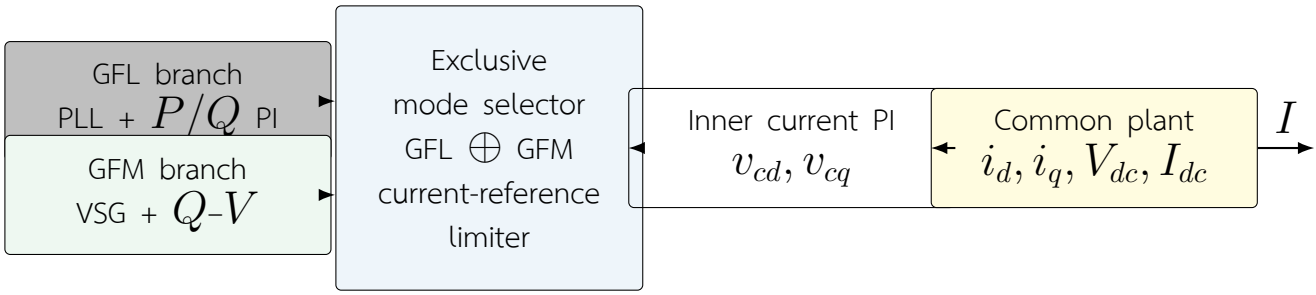
กลุ่ม x_{com} เป็น physical plant states ที่ใช้ร่วมกันในทั้งสองโหมดและ evolve ตลอดเวลา ส่วน x_{GFL} และ x_{GFM} เป็น controller states คนละ branch และ **ไม่ถูกใช้งานพร้อมกัน**. เมื่ออุปกรณ์อยู่ในโหมด GFL จะ active เฉพาะ x_{com} และ x_{GFL} ขณะที่ x_{GFM} ถูก hold ด้วย $\dot{x}_{GFM} = 0$; เมื่อสลับเป็น GFM จะ active เฉพาะ x_{com} 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 mode	GFM mode	หน้าที่
Common	i_d, i_q, V_{dc}, I_{dc}	Active	Active	physical AC/DC plant; ใช้ร่วมกัน และ evolve ต่อเนื่อง
GFL branch	$\delta_{PLL}, \xi_{PLL}, \xi_P, \xi_Q, \xi_{Id}^{GFL}, \xi_{Iq}^{GFL}$	Active	Hold	PLL, P/Q control และ current-control integrators ของ GFL
GFM branch	$\delta_{VSG}, \omega_{VSG}, E, \xi_{Vd}, \xi_{Vq}, \xi_{Id}^{GFM}, \xi_{Iq}^{GFM}$	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: โครงสร้าง IBR แบบ dual-mode: GFL และ GFM ใช้ controller คนละ branch แต่ใช้ AC/DC plant ร่วมกัน

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

$$\dot{i}_d = \frac{\omega_b}{L_f}\left(v_{cd} - v_d - R_f i_d + \omega_{pu} L_f i_q\right), \tag{18}$$

$$\dot{i}_q = \frac{\omega_b}{L_f}\left(v_{cq} - v_q - R_f i_q - \omega_{pu} L_f i_d\right). \tag{19}$$

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

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

$$C_{dc}\dot{V}_{dc} = I_{dc} - \frac{P_{ac}}{V_{dc}} - \frac{\max(0, V_{dc} - V_{dc}^{max})}{R_{ch}}, \tag{20}$$

$$\tau_s \dot{I}_{dc} = \frac{E_{dc} - V_{dc}}{R_{dc}} - I_{dc}, \tag{21}$$

โดย $P_{ac} = v_{cd} i_d + v_{cq} i_q$. ค่า E_{dc} ถูกคำนวณจากเงื่อนไขให้ dispatched point เป็น equilibrium จึงไม่ปรับ เพื่อทำให้ผล TS ดูดีขึ้น ส่วน τ_s ถูกเลือกจาก damping criterion ของวงจร DC และตรวจว่าคู่ eigenvalue อยู่ฝั่งซ้ายของ ระนาบเชิงซ้อนก่อนนำไปใช้

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 หลายร้อย

เท่า 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

8. โหมด Grid-Following: PLL วงกำลัง P/Q และวงกระแสชั้นใน

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

$$\dot{\delta}_{PLL} = k_{p,PLL}v_q + k_{i,PLL}\xi_{PLL}, \qquad \dot{\xi}_{PLL} = v_q. \tag{22}$$

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

$$e_P = \kappa P_{ref} - P_{inv}, \qquad i^*_{d,raw} = k_{pP}e_P + k_{iP}\xi_P, \tag{23}$$

$$e_Q = \kappa Q_{ref} - Q_{inv}, \qquad i^*_{q,raw} = -\left(k_{pQ}e_Q + k_{iQ}\xi_Q\right). \tag{24}$$

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 (19). 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

9. โหมด Grid-Forming: เครื่องซิงโครนัสเสมือนและวง Q-V

GFM ไม่ใช้ PLL ใน active branch แต่สร้างมุมจาก virtual synchronous generator (VSG) ของตัวเอง

$$M\dot{\omega}_{VSG} = \kappa P_{ref} - P_{inv} - D_v(\omega_{VSG} - 1), \tag{25}$$

$$\dot{\delta}_{VSG} = \omega_b(\omega_{VSG} - 1), \tag{26}$$

$$\dot{E} = \frac{k_Q(\kappa Q_{ref} - Q_{inv}) - k_E(E - E_{ref})}{\tau_E}. \tag{27}$$

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

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

10. 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

$$S^- = V\left(I^-\right)^* = P^- + jQ^-, \qquad x^+_{target} = \text{Init}(V, P^-, Q^-). \tag{28}$$

หลังสร้าง state ขวามือแล้วจะคำนวณกระแสใหม่และตรวจ

$$\left|I^+ - I^-\right| \le 10^{-10}, \qquad P^+ \approx P^-, \quad Q^+ \approx Q^-. \tag{29}$$

หากไม่ผ่าน gate transaction จะถูก reject ก่อน commit state เข้าสู่ trajectory นอกจากนี้การ 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

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

11. ตัวกำกับอัตโนมัติและดัชนีความรุนแรง

Supervisor ใช้ค่าความเบี่ยงเบนแรงดันของ IBR และความถี่เฉลี่ยของระบบเพื่อสร้างสอง sub-indices

$$J_V = \frac{\left||V_i| - V_i^\star\right|}{0.10}, \qquad J_f = \frac{|f_{coi} - 60|}{0.50}, \tag{30}$$

และรวมเป็น severity index

$$S(t) = \text{sat}_{[0,1]}\left(0.5J_V + 0.5J_f\right). \tag{31}$$

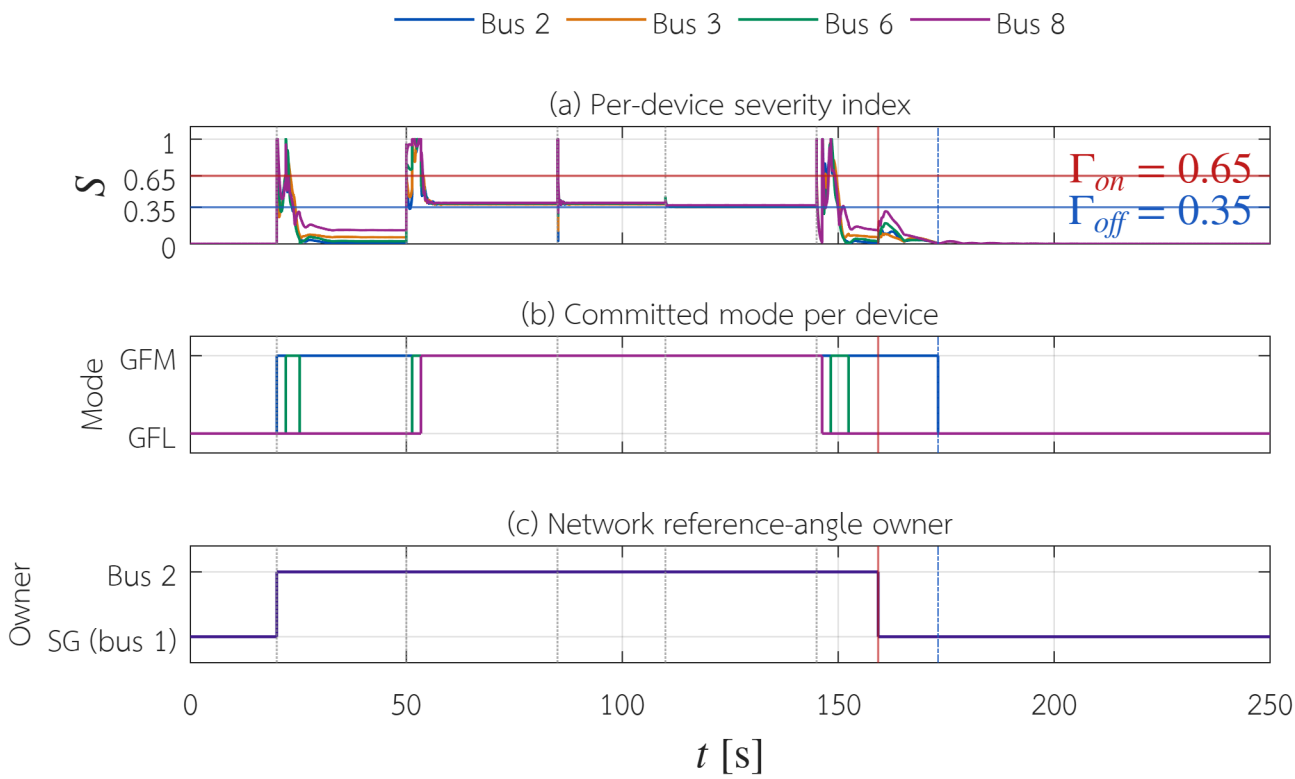
ใช้ hysteresis และ dwell เพื่อลดการ chatter

$$\text{GFL} \longrightarrow \text{GFM}: \quad S \ge 0.65 \text{ ต่อเนื่องอย่างน้อย } 0.10 \text{ s}, \tag{32}$$

$$\text{GFM} \longrightarrow \text{GFL}: \quad S \le 0.35 \text{ ต่อเนื่องอย่างน้อย } 1.00 \text{ s}. \tag{33}$$

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



รูปที่ 4: ดัชนีความรุนแรงรายอุปกรณ์ โหมดที่ commit และผู้ถือ reference angle ของแขนงสลับโหมด

12. การตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับโปรแกรมอ้างอิงภายนอก

การตรวจสอบความถูกต้องของสายงานคำนวณใช้การเปรียบเทียบกับโปรแกรมอ้างอิงภายนอกบนข้อมูลนำเข้าชุดเดียวกัน โดยโปรแกรมอ้างอิงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบเท่านั้น ไม่มีค่าใดจากโปรแกรมเหล่านั้นไหลกลับเข้าสู่การคำนวณของโครงงาน เกณฑ์ยอมรับทุกตัวถูกประกาศไว้ก่อนดูผล

โปรแกรมอ้างอิงหลักคือ PSAT รุ่น 2.1.11 [7] ซึ่งใช้ตัวแก้ Newton สำหรับ Power Flow และวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูที่มี corrector ลู่เข้าสำหรับโดเมนเวลา และโปรแกรมอ้างอิงที่สองคือ PGAz รุ่น 1.1.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมเสถียรภาพแบบคลาสสิกอันดับสอง ผลการเปรียบเทียบสามทางแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7: การเปรียบเทียบผล Power Flow และผลโดเมนเวลากับ PSAT บนข้อมูลนำเข้าชุดเดียวกัน

ปริมาณที่เทียบ	IEEE 14-bus	IEEE RTS-24	เกณฑ์ที่ประกาศก่อน
max $\lvert\Delta\lvert V\rvert\rvert$ (pu)	6.661×10^{-16}	4.441×10^{-16}	$< 10^{-6}$
max $\lvert\Delta\theta\rvert$ (deg)	3.553×10^{-14}	6.750×10^{-14}	$< 10^{-4}$
max $\lvert\Delta Y_{\text{net}}\rvert$	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 $\lvert\Delta\lvert V\rvert\rvert$ ระหว่างเกิด fault (pu)	3.179×10^{-5}	5.354×10^{-6}	$< 10^{-3}$

ผลสำคัญ: ผล Power Flow ตรงกับ PSAT ที่ระดับความละเอียดของเครื่อง และผลโดเมนเวลาผ่านทุกเกณฑ์ที่ประกาศไว้ก่อน โดยไม่มีการปรับพารามิเตอร์ ตัวแก้ หรือค่า tolerance ใดเพื่อให้ผลตรงกัน

การเปรียบเทียบกับ PGAz **ไม่ผ่าน** เกณฑ์เดียวกันอย่างตรงไปตรงมา โดยมุม COI ต่างกันประมาณ 0.6 องศาสำหรับ IEEE 14-bus และ 0.3 องศาสำหรับ RTS-24 ซึ่งเกินเกณฑ์ 0.05 องศา งานนี้ตรวจสอบสมมติฐานว่าความต่างเกิดจากจำนวนรอบ corrector ที่ตรึงไว้ แล้ว *หักล้างสมมติฐานนั้นได้* คือเมื่อเพิ่มจำนวนรอบเป็น 3, 8 และ 12 รอบ ค่าความต่างยัง

คงอยู่ที่ระดับเดิม ในขณะที่ Y_{net} ของเครือข่าย admittance ของ fault และการจับคู่หมายเลขบัสตรงกันทั้งหมด ความต่างที่เหลือจึงเป็นลักษณะของสูตรการอินทิเกรตของ PGAz เอง ไม่ใช่ของสายงานคำนวณในโครงงานนี้ ผลนี้ถูกรายงานเป็น FAIL ตามที่วัดได้ ไม่มีการผ่อนเกณฑ์เพื่อให้ผ่าน และไม่มีการแก้ไขโปรแกรมอ้างอิง

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 $1.686 \times 10^{-7}, 5.799 \times 10^{-9}$ และ 1.078×10^{-7} สำหรับสามแบบจำลองที่ตรวจ ทั้งหมดต่ำกว่าเกณฑ์ที่ประกาศไว้ก่อนคือ 10^{-3} หลายอันดับ ขั้นผลต่างจำกัดที่ใช้ในการผลิตจึงอยู่บนที่ราบนี้ ไม่ได้ถูกเลือกเพื่อให้ค่า eigenvalue ดูดี

การเทียบกับตารางที่ 9.5 ของ Padiyar [3] เป็นการตรวจสอบเชิงวินิจฉัยเท่านั้น ไม่ใช่เกณฑ์ยอมรับ ผลที่วัดได้คือระยะห่างสูงสุดของคู่ eigenvalue ที่จับคู่กันได้ประมาณ 4.3×10^{-2} เนื่องจากการศึกษาที่ราบข้างต้นแสดงว่า eigenvalue เปลี่ยนเพียงระดับ 10^{-7} เมื่อเปลี่ยนขั้นผลต่างจำกัด ความต่าง 4×10^{-2} นี้จึงไม่สามารถอธิบายด้วยสัญญาณรบกวนของผลต่างจำกัดได้ สาเหตุที่แท้จริงยังไม่ได้ข้อสรุป และอาจมาจากความต่างของแบบจำลอง ข้อมูล convention ของสัญลักษณ์ การกำหนดค่าเริ่มต้น หรือความละเอียดของค่าที่ตีพิมพ์ ไม่มีพารามิเตอร์ ค่าคงตัวเวลา ตัวคูณ แบบจำลองโหลด ขั้นผลต่างจำกัด หรือค่า tolerance ของตัวแก้ใดถูกปรับเพื่อลดความต่างนี้

13. การทดสอบแบบจำลอง IBR บนระบบ SMIB

ก่อนนำ IBR ไปประกอบในระบบ IEEE 14-bus แบบจำลองแต่ละโหมดถูกทดสอบแยกบนระบบ single-machine infinite-bus (SMIB) ซึ่งมีคำตอบวงจรอนุกรมในรูปปิดใช้เทียบได้ จุดทำงานที่ใช้คือแรงดันปลายทาง $V = 1.0\angle 0^\circ$ 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 8: ผลการตรวจสอบแบบจำลอง IBR บนระบบ SMIB (สองกรณีแยกกัน)

ปริมาณที่ตรวจ	GFL (10 state)	GFM ไม่มี PLL (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}
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}
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

14. วิธีตรวจสอบและหลักฐานที่ใช้ยืนยันแบบจำลอง

โครงงานใช้แนวทาง “สมการเดียวกัน–หลายการตรวจสอบ” คือไม่สร้าง simplified model แยกขึ้นมาเพื่อทำให้ผล validation ผ่าน ตารางที่ 9 สรุปสิ่งที่ตรวจและเหตุผลของแต่ละ gate โดยผลทั้งหมดในรายงานนี้อ้างเฉพาะกรณี IEEE 14-bus และแบบจำลองที่ประกอบอยู่ในกรณีดังกล่าว

ตารางที่ 9: สรุปการตรวจสอบที่ใช้กับกรอบ IEEE 14-bus

ส่วนที่ตรวจ	วิธีตรวจ	เกณฑ์/หลักฐานสำคัญ
Power Flow	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 และ จัดการ 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

15. เหตุการณ์ทดสอบและผลการจำลองในโดเมนเวลา

กรณีหลักจำลองเป็นเวลา 250 วินาที เพื่อให้ครอบคลุมทั้งการสูญเสีย SG การเปลี่ยนกำลังโหลด fault การเปลี่ยนโครงสร้างเครือข่าย และการคืนระบบ ดังตารางที่ 10 ตารางนี้แยกสองประเภทของเวลาให้ชัดเจน คือเวลาที่กรณีศึกษากำหนดไว้ล่วงหน้า และเวลาที่เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณของระบบเอง การแยกนี้สำคัญเพราะเวลาประเภทหลังเป็นสิ่งที่การจำลองผลิตขึ้น ไม่ใช่สิ่งที่ป้อนเข้าไป

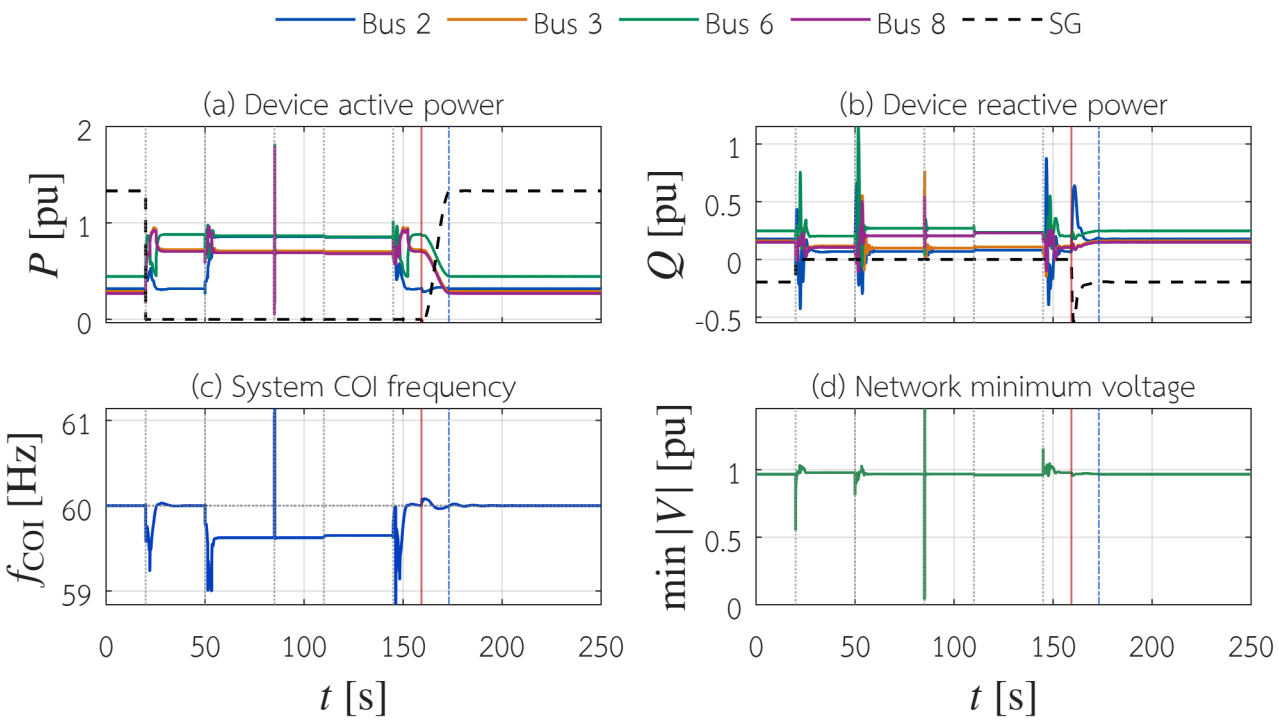
ตารางที่ 10: ลำดับเหตุการณ์ของกรณี IEEE 14-bus แยกตามประเภทของเวลา

เวลา (s)	ประเภท	เหตุการณ์และรายละเอียด
20.000	กำหนดไว้	ปลด SG ที่บัส 1 ระบบเข้าสู่ช่วงที่ IBR ต้องถือมุมอ้างอิง
22.089, 51.340, 53.379, 148.281	ผลคำนวณ	เพิ่ม GFM รวมสี่ครั้งตามดัชนีความรุนแรงและเวลาหน่วงคงสถานะ
25.303, 146.278, 152.402	ผลคำนวณ	ลด GFM รวมสามครั้งเมื่อดัชนีกลับต่ำกว่าเกณฑ์ปลด
50.000	กำหนดไว้	เพิ่มโหลดร้อยละ 20 เพื่อทดสอบการรองรับกำลังจริง
85.000–85.150	กำหนดไว้	fault ที่บัส 9 ด้วย $Z_f = 0.01 + j0.01$ pu แล้วเคลียร์หลัง 0.15 s
110.000	กำหนดไว้	ปลดสายส่งระหว่างบัส 6 และ 13 ทำให้ Y_{net} เปลี่ยน
145.000	กำหนดไว้	เริ่มกระบวนการคืน SG และตรวจ synchronism
159.252	ผลคำนวณ	ปิดเบรกเกอร์ SG สำเร็จ ($\Delta V = 0.008785$ pu, $\Delta\theta = 5.015°$)
173.127	ผลคำนวณ	IBR ตัวสุดท้ายคืนจาก GFM สู่ GFL ใช้เวลา 13.875 s หลังปิดเบรกเกอร์
250.000	กำหนดไว้	จบขอบเขตเวลาของการจำลอง

วิถีของนโยบายสลับเดินครบ 250 วินาที มีจุดตัวอย่างที่ยอมรับแล้ว 3679 จุด และมีขั้นเวลาที่ตัวควบคุมปฏิเสธ 161 ครั้ง การมีขั้นที่ถูกปฏิเสธไม่ใช่ความล้มเหลวของผล เพราะขั้นเหล่านั้นถูกย้อนกลับและลดขนาดขั้นเวลาใหม่ก่อนรับคำตอบ ค่าที่ยืนยันคุณภาพของการรันคือ residual สูงสุดของทุกขั้นที่ยอมรับเท่ากับ 9.9721×10^{-9} ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 10^{-8} ที่ประกาศไว้ก่อน และความลึกของการแบ่งขั้นเวลาย่อยเท่ากับศูนย์ กล่าวคือไม่มีขั้นใดต้องอาศัยการแบ่งย่อยเพื่อผ่านไปได้

ตารางที่ 11: ผลสรุปเชิงปริมาณของวิถีนโยบายสลับ

ปริมาณ	ค่า	ความหมาย
ขอบเขตเวลาที่เดินถึง	250.000 s	เดินครบโดยไม่มีการประมาณค่าออกนอกช่วง
ช่วงแรงดันขณะเกิดเหตุการณ์	0.036855–1.523199 pu	ค่าสุดขีดระหว่าง fault และการสลับ ไม่ใช่พิกัดใช้งาน
ช่วงความถี่เฉลี่ยระบบ	58.839081–61.138547 Hz	ค่าสุดขีดของเหตุการณ์ทั้งหมดในขอบเขตเวลา
ความถี่เฉลี่ยที่ปลายการรัน	60.000001 Hz	กลับเข้าใกล้ค่าพิกัดเมื่อจบการจำลอง
ช่วงแรงดันที่ปลายการรัน	0.9667–1.0575 pu	ช่วงแรงดันของทุกบัสที่ $t = 250$ s
residual สูงสุดที่ยอมรับ	9.9721×10^{-9}	ผ่านเกณฑ์ 10^{-8} ที่ประกาศไว้ก่อน
ความลึกของการแบ่งขั้นย่อย	0	ไม่มีขั้นใดต้องแบ่งย่อยเพื่อผ่าน
จำนวนขั้นที่ถูกปฏิเสธ	161	ถูกย้อนกลับทั้งหมด ไม่ปรากฏในวิถีที่พล็อต
จำนวน GFM สูงสุดพร้อมกัน	4	เพิ่มเป็นลำดับสี่ครั้ง ไม่ได้สั่งพร้อมกันทั้งหมด



รูปที่ 5: ผลตอบสนองทางไฟฟ้าของแขนงสลับโหมดตลอดลำดับเหตุการณ์ 250 วินาที: กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟรายอุปกรณ์ ความถี่เฉลี่ยระบบ และแรงดันต่ำสุดของเครือข่าย

จากบันทึกเหตุการณ์ ตัวกำกับเพิ่ม GFM ที่ 22.089, 51.340, 53.379 และ 148.281 วินาที และลดลงที่ 25.303, 146.278 และ 152.402 วินาที ก่อนคืน IBR ตัวสุดท้ายสู่ GFL ที่ 173.127 วินาทีหลัง SG กลับมา การเพิ่มเป็นลำดับนี้เกิดจากดัชนีความรุนแรงร่วมกับเวลาหน่วงคงสถานะ และการเลือกชุด candidate จากตารางที่ผ่านการรับรอง จำนวน GFM จึงไม่ได้ถูกผูกกับเวลาเหตุการณ์ไว้ล่วงหน้า

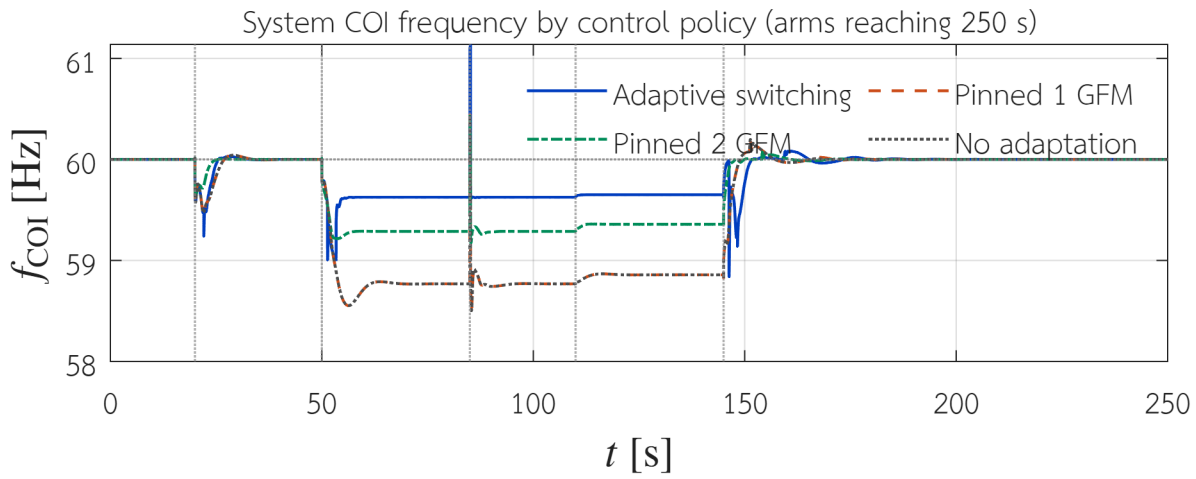
16. การเปรียบเทียบนโยบายควบคุมและสิ่งที่สรุปได้จากผล

เพื่อแยกผลของ “การสลับโหมดตามสภาวะ” ออกจากผลของ “การมี GFM อยู่เฉย ๆ” งานนี้ทดลองนโยบายควบคุมหกแบบบนเครือข่าย ชุดจ่ายโหลด ตารางเหตุการณ์ ตัวแก้สมการ และตัวควบคุมขั้นเวลาชุดเดียวกัน ความต่างเพียงอย่างเดียวระหว่างแขนงคือนโยบายการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นความต่างของผลที่วัดได้จึงอธิบายได้ด้วยนโยบายเท่านั้น ตัวเลขที่ยืนยันเงื่อนไขนี้คือทุกคู่แขนงให้ผลตรงกันทุกบิตบนช่วง $[0, 20)$ วินาที รวม 42 จุดตัวอย่าง ซึ่งเป็นช่วงก่อนเหตุการณ์แรก ผลสรุปแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12: การเปรียบเทียบนโยบายควบคุมหกแบบบนกรณีศึกษา IEEE 14-bus ชุดเดียวกัน

นโยบาย	ถึงเวลา (s)	ปิดเบรกเกอร์ (s)	ผลและข้อสังเกต
สลับแบบทยอย	250.000	159.252	สำเร็จ; เพิ่มและลดจำนวน GFM ตามดัชนีความรุนแรง แล้วคืนมุมอ้างอิงสู่ SG
ตรึง 1 GFM	250.000	151.132	สำเร็จ; ถึงขอบเขตเวลาและปิดเบรกเกอร์ได้โดยไม่ต้องปรับโหมด
ตรึง 2 GFM	250.000	154.024	สำเร็จ; เป็นชุดที่มี damping margin ดีที่สุดในตารางเชิงเส้น
ตรึง 4 GFM	25.485	–	หยุดที่ขั้นเวลาต่ำสุด; ผ่านการคัดกรองเชิงเส้นแต่วิถีไม่เชิงเส้นไปไม่ถึงชุดนี้อย่างเสถียร
ตรึง GFL ทั้งหมด	20.000	–	ถูกปฏิเสธที่เหตุการณ์ปลด SG เพราะไม่มีแหล่ง voltage-forming เหลืออยู่
ปิดการปรับโหมด	250.000	151.132	สำเร็จ; คอมมิท GFM หนึ่งตัวครั้งเดียวแล้วไม่เพิ่มเมื่อการรบกวนรุนแรงขึ้น

ผลสำคัญ: แขนงที่ถึงขอบเขตเวลา 250 วินาทีมีสี่แขนง แขนงตรึง GFL ทั้งหมดถูกปฏิเสธที่ $t = 20$ s และแขนงตรึง 4 GFM หยุดที่ $t = 25.485$ s เครื่องหมาย – หมายถึงปริมาณนั้นไม่นิยามสำหรับแขนงนั้น ไม่ใช่ค่าศูนย์



รูปที่ 6: ผลเปรียบเทียบความถี่เฉลี่ยระบบระหว่างนโยบายควบคุมที่ถึงขอบเขตเวลา 250 วินาที

เมื่อเปรียบเทียบเชิงปริมาณต้องแยกตัวชี้วัดสองชนิดให้ชัด คือค่าเบี่ยงเบนความถี่ *สูงสุด* ขณะเกิดเหตุการณ์ กับค่าเบี่ยงเบนความถี่ที่ *เข้าที่แล้ว* หลังเหตุการณ์นั้น ตารางที่ 13 แสดงทั้งสองค่าของนโยบายสลับแบบทยอยเทียบกับนโยบายตรึงหนึ่งตัว

ตารางที่ 13: ค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดและที่เข้าที่แล้วของแต่ละหน้าต่างเหตุการณ์ (หน่วย Hz)

หน้าต่างเหตุการณ์	สลับแบบทยอย		ตรึง 1 GFM	
	สูงสุด	เข้าที่	สูงสุด	เข้าที่
ปลด SG	0.7599	0.0043	**0.5311**	0.0100
เพิ่มโหลด	**1.0034**	**0.3753**	1.4478	1.2219
เกิดและเคลียร์ fault	**1.1385**	**0.3753**	1.4978	1.2296
ปลดสายส่ง	**0.3764**	**0.3503**	1.2325	1.1426
คืนระบบและปิดเบรกเกอร์	**1.1609**	**0.0134**	1.1736	0.0197

ผลสำคัญ: บนค่าเบี่ยงเบนที่เข้าที่แล้ว นโยบายสลับแบบทยอยดีที่สุดในทุกหน้าต่าง โดยที่หน้าต่าง fault ดีกว่าถึง 3.28 เท่า (0.3753 เทียบกับ 1.2296 Hz) แต่บนค่าสูงสุดขณะปลด SG นโยบายตรึงหนึ่งตัวดีกว่า (0.5311 เทียบกับ 0.7599 Hz) รายงานนี้ระบุผลตามที่วัดได้ทั้งสองด้าน

ผลนี้ให้ข้อสรุปสำคัญสามประการ ประการแรก หลังสูญเสีย SG ระบบต้องมีแหล่ง voltage-forming อย่างน้อยหนึ่งตัว มิฉะนั้นปัญหาไม่ใช่เพียงว่าความถี่แย่ลง แต่เป็นว่าระบบไม่มีมุมอ้างอิงและสมการไม่ควรถูกแก้ต่อ การปฏิเสธของแขนงตรึง GFL ทั้งหมดที่ $t = 20$ วินาทีจึงเป็นผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ไม่ใช่ความล้มเหลว ประการที่สอง ชุด candidate ที่ผ่านการคัดกรองด้วย SSSA ไม่ได้รับประกันว่าระบบจะเดินทางจาก state ปัจจุบันไปถึงชุดนั้นได้ในการจำลองไม่เชิงเส้น ดังที่เห็นจากแขนงตรึง 4 GFM ซึ่งผ่านการคัดกรองเชิงเส้นแต่หยุดที่ $t = 25.485$ วินาที ผลนี้แสดงว่าการวิเคราะห์เชิงเส้นเป็นเงื่อนไขจำเป็นแต่ไม่เพียงพอ ประการที่สาม ประโยชน์ของนโยบายสลับมาจาก *ลำดับของการเปลี่ยนโหมด* ไม่ใช่เพียงชุด GFM สุดท้าย เพราะระบบเพิ่ม voltage-forming support ทีละขั้นและตรวจการเปลี่ยนผ่านก่อน commit ทุกครั้ง

17. สรุปผลงานที่พัฒนาได้จริงในโครงงาน

จากการดำเนินงานสามารถสรุปสิ่งที่พัฒนาและทดสอบได้ดังนี้

1. พัฒนา Power Flow ของ IEEE 14-bus และการส่งต่อผลไปสร้าง DAE equilibrium โดยใช้ convention ของแรงดัน กระแส กำลัง และ per-unit base ชุดเดียวกันตลอดสายงาน
2. พัฒนาการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กบนระบบ DAE ประกบที่คง KCL ทุกแถว พร้อมการลดรูปด้วย 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 ที่ใช้ PLL และสาขา GFM ที่ใช้ VSG พร้อม current limiter และ anti-windup
6. พัฒนาแผนที่ถ่ายโอนเชิงกายภาพระหว่างสองโหมดที่รักษากระแสปลายทาง กำลัง P/Q, V_{dc} และ I_{dc} ภายในค่าความคลาดเคลื่อนที่ประกาศไว้ก่อนคอมมิท
7. พัฒนาตัวกำกับอัตโนมัติที่ใช้ดัชนีความรุนแรงของแรงดันและความถี่ ฮิสเทอรีซิส เวลาหน่วงคงสถานะ การป้องกันการสูญเสียมุมอ้างอิง ตารางชุด candidate ที่ผ่านการรับรอง และใบรับรองการเปลี่ยนผ่านแบบไม่เชิงเส้น
8. ทดสอบแบบครบวงจรบน IEEE 14-bus ด้วยการปลด SG การเพิ่มโหลด fault การปลดสายส่ง และการคืน SG จนวิถีของนโยบายสลับเดินครบ 250 วินาทีและคืนระบบกลับสู่สภาพ GFL ทั้งหมดหลังปิดเบรกเกอร์

18. ข้อจำกัดของผลและสิ่งที่ยังไม่อ้าง

เพื่อให้ผลในรายงานนี้ถูกนำไปใช้ต่อได้อย่างถูกต้อง หัวข้อนี้ระบุขอบเขตของข้ออ้างอย่างชัดเจน สิ่งที่ *พิสูจน์แล้ว* คือกรอบการทำงานที่ประกอบขึ้นสามารถเดินครบขอบเขตเวลา 250 วินาทีของกรณีศึกษา IEEE 14-bus ที่กำหนดไว้ พร้อมคืนมุมอ้างอิงกลับสู่ SG หลังเบรกเกอร์ปิด โดยทุกขั้นเวลาที่ยอมรับผ่านเกณฑ์ residual ที่ประกาศไว้ก่อน และผล Power Flow กับผลโดเมนเวลาตรงกับโปรแกรมอ้างอิง PSAT ภายในเกณฑ์ที่ประกาศไว้ก่อน

สิ่งที่ *ยังไม่อ้าง* มีดังนี้ ประการแรก แบบจำลองเป็นแบบสมดุลสามเฟสในกรอบ RMS phasor จึงไม่ครอบคลุมพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงเวลาที่เร็วกว่าขั้นเวลาของ phasor และไม่ครอบคลุมกรณีไม่สมดุล ประการที่สอง รายงานนี้ *ไม่ได้อ้าง* ความสอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อ (grid code) ใด ๆ เนื่องจากยังไม่ได้จำลองระบบป้องกัน การทนแรงดันตก (fault ride-through) และข้อจำกัดพิกัดอุปกรณ์อย่างครบถ้วน ประการที่สาม ผลทั้งหมดผูกกับกรณีศึกษา ชุดจ่ายโหลด และตารางเหตุการณ์ชุดเดียวนี้ การขยายไปสู่ระบบขนาดใหญ่หรือจำนวน IBR ที่มากกว่านี้ยังไม่ได้ประเมิน ประการที่สี่ ค่าจากตารางที่ 9.5 ของ Padiyar [3] ยังมีความต่างระดับ 4.3×10^{-2} ที่ยังไม่ได้ข้อสรุปเรื่องสาเหตุ และถูกรายงานไว้ตามที่วัดได้โดยไม่ปรับพารามิเตอร์ใด ประการที่ห้า การเปรียบเทียบกับ PGAz ไม่ผ่านเกณฑ์และถูกรายงานเป็น FAIL ตามจริง โดยได้

แสดงหลักฐานว่าความต่างอยู่ที่สูตรการอินทิเกรตของโปรแกรมอ้างอิงนั้น ไม่ใช่ที่สายงานคำนวณของโครงงาน

ข้อจำกัดเชิงการเปรียบเทียบที่ต้องระบุให้ตรงตามที่วัดได้คือ นโยบายสลับแบบทยอยไม่ได้ชนะทุกตัวชี้วัดในทุกหน้าต่างเวลา บนตัวชี้วัดค่าเบี่ยงเบนที่เข้าที่แล้วนโยบายนี้ดีที่สุดในทุกหน้าต่างหลังเหตุการณ์แรก แต่บนตัวชี้วัดค่าเบี่ยงเบนสูงสุดขณะเกิดเหตุการณ์ปลด SG นโยบายตรึงหนึ่งตัวให้ค่าที่ต่ำกว่า (0.5311 Hz เทียบกับ 0.7599 Hz) ข้อสรุปของรายงานนี้จึงระบุขอบเขตของตัวชี้วัดและหน้าต่างเวลาไว้ทุกครั้ง

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

ประโยชน์ด้านวิชาการและการพัฒนาแบบจำลอง

1. ได้กรอบการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้สมการและการส่งต่อ state ชุดเดียวกันตั้งแต่ Power Flow, 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 250 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 ที่ผ่านการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กไม่ได้ผ่านการจำลองไม่เชิงเส้นทุกกรณี ตัวอย่างชัดเจนคือชุดที่ตรึง GFM ทั้งสี่ตัวซึ่งผ่านการคัดกรองเชิงเส้นแต่หยุดที่ $t = 25.485$ วินาที
4. การจำลองแบบอิมพลิซิตพร้อมการปรับขั้นเวลาอัตโนมัติใช้เวลาคำนวณสูง โดยเฉพาะช่วงเกิด fault และช่วงที่โครงสร้างเครือข่ายเปลี่ยน ซึ่งต้องแก้สมการไม่เชิงเส้นซ้ำหลายครั้งต่อหนึ่งขั้นเวลา
5. แบบจำลอง IBR ต้นทางให้สมการฝั่ง AC และตัวควบคุมไว้ครบ แต่ไม่ได้กำหนดกฎของแหล่งจ่ายฝั่ง DC หากปิดสมการด้วยแหล่งจ่ายอุดมคติ V_{dc} จะแทบไม่ตอบสนองและค่าคาปาซิแตนซ์ C_{dc} จะหายออกจากพลวัตทั้งหมด

แนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น

1. กำหนดการป้องกันการสูญเสียมุมอ้างอิงให้ตรวจก่อนทุกครั้งว่ามี SG หรือ GFM อย่างน้อยหนึ่งแหล่งในเกาะที่ยังจ่ายไฟ หากไม่มีให้ปฏิเสธเหตุการณ์นั้นแบบ fail-closed ก่อนเรียกตัวแก้สมการ แทนการฝืนคำนวณต่อบนระบบที่ไม่มีมุมอ้างอิง
2. ใช้เวกเตอร์ state แบบ superset ที่มีขนาดคงที่สำหรับ IBR และกำหนดขั้นตอนถ่ายโอนที่ชัดเจน คือคง state ของภาคกำลังไว้ กำหนดค่าเริ่มต้นให้สาขาปลายทางจากพอร์ตปลายทางเดิม และตรวจความต่อเนื่องของกระแสก่อน commit
3. ใช้การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กเป็นเพียงการคัดกรองขั้นแรก และยืนยันชุดที่เลือกด้วยการจำลองไม่เชิงเส้นทุกครั้งเพื่อไม่ให้ผลเชิงเส้นถูกตีความเกินขอบเขตที่พิสูจน์ได้
4. ใช้ตัวแก้แบบสี่เหลี่ยมคางหมูอิมพลิซิตร่วมกับการควบคุมขั้นเวลา การลงจุดเหตุการณ์อย่างแม่นยำ และการย้อนกลับขั้นที่ถูกปฏิเสธ ซึ่งลดปัญหาการลู่เข้าในช่วงที่การรบกวนรุนแรงโดยไม่ต้องผ่อนเกณฑ์ใด
5. แทนการปิดสมการ DC แบบอุดมคติด้วยแหล่งจ่ายแบบเทเวนินที่มีความต้านทานภายใน กระแสแหล่งจ่ายเป็น state และ chopper กันแรงดันเกิน จากนั้นตรวจ equilibrium, ตำแหน่ง eigenvalue ของคู่ DC, ขอบเขตของโหลดกำลังคงที่ และความไวต่อค่า C_{dc} ก่อนนำไปใช้กับกรณี IEEE 14-bus

โครงงานที่คาดว่าจะดำเนินการต่อไป

1. ขยายจากแบบจำลองสมดุลในกรอบ RMS phasor ไปสู่เครือข่ายไม่สมดุลและการวิเคราะห์ทรานเซียนต์เชิงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic transient) พร้อมเพิ่มแบบจำลองระบบป้องกัน การจำกัดกระแสในสภาวะผิดพร่อง และการทนแรงดันตก เพื่อให้สามารถอ้างความสอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อได้ในอนาคต
2. ทดสอบกรอบการคัดเลือกชุด GFM บนระบบที่ใหญ่กว่า IEEE 14-bus และมีจำนวน IBR มากกว่าสี่ตัว เพื่อประเมินความสามารถในการขยายขนาดของการแจงนับชุด candidate ซึ่งเติบโตแบบเลขชี้กำลังตามจำนวนอุปกรณ์
3. พัฒนาเกณฑ์คัดเลือกชุด candidate ให้พิจารณาร่วมกันทั้ง damping ratio, การรองรับแรงดัน ระดับการใช้งานของคอนเวอร์เตอร์ พลังงานสำรอง และต้นทุนของการสลับโหมด แทนการใช้ damping margin เพียงตัวเดียว
4. เชื่อมต่อแบบจำลองกับการทดสอบแบบ hardware-in-the-loop หรือต้นแบบตัวควบคุม เพื่อทดสอบการสลับโหมดและการคืนโหมดภายใต้ข้อจำกัดของระบบควบคุมจริง เช่น เวลาสุ่มสัญญาณ ความหน่วงของการสื่อสาร และความละเอียดของการวัด

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.

[17] P. Jueajan, P. Phadungdaen, S. Jaingeawkham, T. Surinkaew, and I. Ngamroo, "A Bayesian optimization-based GFL/GFM mode switching strategy for dynamic stability enhancement in low-inertia power systems," EECON49 (submitted), KMITL, 2026.