การสลับโหมด Grid-Following $\leftrightarrow$ Grid-Forming อัตโนมัติของ IBR สองตัว ด้วยดัชนีเสถียรภาพปรับตัว (AGSI) บน Infinite Bus

หลักการ สมการทุกขั้นตอนโดยละเอียด และการถ่ายโอนแบบต่อเนื่องกระแส (bumpless)

23 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ (แยกจากรายงานเปรียบเทียบ GFL/GFM แบบ 6 states ฉบับก่อนหน้า) อธิบาย **กลไกการสลับ โหมดอัตโนมัติ** ระหว่าง Grid-Following (GFL) และ Grid-Forming (GFM) สำหรับ IBR สองตัวที่จุดเชื่อมต่อร่วม (PCC) เดียวกัน ผ่านสายส่ง Z_{line} สู่ ideal infinite bus *โดยอธิบายทุกสมการและทุกขั้นตอนอย่าง ละเอียด*: ตั้งแต่กรอบ DAE กระแสฉีดและกำลัง สมการโครงข่าย (KCL) การหาสมดุลเริ่มต้น สมการดัชนีเดียว **Adaptive Grid Stability Index (AGSI)** พร้อมดัชนีย่อยและอัลกอริทึมคำนวณ เกณฑ์การสลับ (เส้นอ้างอิง $\Gamma_{on}, \Gamma_{off}$ ฮิสเทอรีซิส เวลาหน่วง) การพิสูจน์การถ่ายโอนแบบต่อเนื่องกระแส และตัวขับจำลอง เชิงเวลา (implicit trapezoidal + Newton) ผลการจำลอง (project-owned MATLAB, ไม่มี external solver) ยืนยัน วงจรสลับสองทางที่ลู่เข้าทุกสเต็ป กระแสต่อเนื่องระดับ 10^{-17} สมการทั้งหมดอ้างอิงได้และไม่มีการปรับค่า เพื่อบิดผล

สารบัญ

1 ขอบเขตและความเชื่อมโยง 3

2 กรอบสมการและระบบทดสอบ 3
- 2.1 ทำไมต้องสลับโหมด . . . 3
- 2.2 Disturbance ที่บังคับให้ GFL ต้องสลับ และกลไกทางฟิสิกส์ . . . 3
- 2.3 กรอบ DAE ร่วม กระแสฉีด และกำลัง . . . 3
- 2.4 ระบบทดสอบ: IBR สองตัวที่ PCC ร่วม + infinite bus . . . 4
- 2.5 การหาสมดุลเริ่มต้นที่ PCC (ก่อนเหตุการณ์) . . . 4
- 2.6 คลาสอุปกรณ์สลับได้ (`SwitchableIbr6`) . . . 5

3 สมการการสลับ: ดัชนี AGSI และเส้นอ้างอิง 5
- 3.1 นิยามดัชนี AGSI . . . 5
- 3.2 ความหมายของแต่ละพจน์ . . . 5
- 3.3 อัลกอริทึมการคำนวณ AGSI (ทีละขั้น) . . . 6
- 3.4 เกณฑ์การสลับ (index ทำงานอย่างไร) . . . 6
- 3.5 AGSI++ : ส่วนขยายที่นำมาใช้เป็นหลัก . . . 7

4 การถ่ายโอนแบบต่อเนื่องกระแส (bumpless transfer) 9

5 ตัวขับจำลองเชิงเวลา (TDS driver) 9
- 5.1 Implicit-trapezoidal คู่กับ KCL . . . 9
- 5.2 เหตุการณ์กริดอ่อนชั่วคราวและ ramp เรียบ . . . 10

6 ผลการจำลอง 10

7 วิธีรัน 11

8 สรุปและข้อจำกัด 11

9 การศึกษาขยาย: การสลับโหมดอัตโนมัติบนระบบหลายเครื่องสองระบบ 12
- 9.1 สมการดัชนีการสลับ AGSI / AGSI++ (ฉบับปรับปรุง) . . . 12
- 9.2 แบบจำลอง IBR ลดรูป 6 states (ลำดับสถานะและสมการ) . . . 12
- 9.3 คลาส Switchableibr6 และการถ่ายโอนแบบต่อเนื่องกระแส . . . 13
- 9.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส: Padiyar model-1.1 . . . 14
- 9.5 ระบบทดสอบสองระบบ . . . 14
  - 9.5.1 ระบบที่ 1: Padiyar two-area (จุดทำงานไม่เสถียร) . . . 14
  - 9.5.2 ระบบที่ 2: IEEE 14-bus (จุดทำงานเสถียร) . . . 16

10 การวิเคราะห์เชิงลึก 18
- 10.1 ทำไม Padiyar two-area จึงไม่เสถียร แต่ IEEE 14-bus เสถียร . . . 18
- 10.2 ประโยชน์ของ AGSI++ . . . 19
- 10.3 ผลของเวลาหน่วง (dwell) เปิด/ปิด . . . 19

1 ขอบเขตและความเชื่อมโยง

รายงานก่อนหน้า (`report_ibr_gfl_gfm_th`) อธิบายลำดับ state และ SSSA ของแบบจำลอง IBR ลดรูป **6 states** สองชุด (GFL และ GFM) ฉบับนี้ *นำสองแบบจำลองนั้นมาใช้ซ้ำเป็นแกนสมการ* (single source of truth) แล้วเพิ่ม **ชั้นควบคุมกำกับ (supervisor)** ที่สลับโหมดอัตโนมัติ จึงเน้น *หลักการ และสมการของการสลับ* โดยอธิบายทุกขั้นตอน

Source discipline. โครงสร้างการสลับ (AGSI, เส้นเกณฑ์, เวลาหน่วง) ยึด *แนวทาง* งาน EECON49-P4 [1] ที่เสนอกลยุทธ์สลับ GFL/GFM ด้วย AGSI ร่วมกับ Bayesian Optimization (BO) ฉบับนี้ใช้เป็น *แนวทางเชิงออกแบบ ไม่ใช่ทำซ้ำเป๊ะ* (นำรูปสมการ AGSI และค่าเริ่มต้นจาก §4.1 มาปรับใช้ กับระบบสองตัว โดย *ไม่* ทำ BO) จึงจัดชั้น `PROJECT_DERIVED_SOURCE_GUIDED`

2 กรอบสมการและระบบทดสอบ

2.1 ทำไมต้องสลับโหมด

GFL พึ่ง *PLL* ซิงก์กับแรงดันกริด ทำงานดีเมื่อกริด *แข็งแรง* แต่เมื่อกริด *อ่อน* (อิมพีแดนซ์สายสูง หรือสูญเสียแหล่งอ้างอิง) พลวัต PLL หน่วงน้อยลง และอาจไม่เสถียร ตรงข้ามกับ GFM (VSG) ที่ *สร้างแรงดัน/ความถี่อ้างอิงได้เอง* จึงประคองกริดอ่อนได้ แนวคิดคือ ตรวจสภาวะแบบเรียลไทม์แล้วสลับ GFL⟶GFM เมื่อเครียด และ GFM⟶GFL เมื่อกลับปกติ

2.2 Disturbance ที่บังคับให้ GFL ต้องสลับ และกลไกทางฟิสิกส์

Disturbance ที่ใช้ในรายงานนี้ คือ *เหตุการณ์กริดอ่อนตัวชั่วคราว (temporary weak-grid event)*: ที่เวลา t_{ev} อิมพีแดนซ์สายส่งสู่ infinite bus ถูกคูณด้วยแฟกเตอร์ (default $\times 4$: Z_{line} จาก $0.30j \rightarrow 1.20j$ pu) จำลองการ *สูญเสียเส้นทางส่งกำลังที่แข็งแรง* หรือการแยกส่วนกริดบางส่วน ทำให้เหลือ กริดที่ *อ่อน* (short-circuit ratio, SCR ต่ำลง เพราะ SCR $\propto 1/Z_{line}$ การคูณสาย $\times 4$ ทำให้ SCR ลดเหลือ $\sim 1/4$) นอกจากนี้กรอบงานยังรองรับ disturbance อื่น: การกระโดดเฟส/แรงดันของ V_∞ (grid phase/voltage step) และการ *สูญเสียแหล่งอ้างอิง* (GRA $= 0$ เช่น slack/SG ถูกปลด จน กลายเป็นเกาะ) ในการสาธิตเลือก “กริดอ่อนล้วน” (ไม่มีเฟส snap) เพื่อให้ transient เบาและกราฟอ่านง่าย

ทำไม disturbance นี้จึงบังคับให้ GFL ต้องสลับ (ลำดับเหตุผล):

1. GFL ทำตัวเป็น *แหล่งกระแส* ที่ควบคุมกำลัง P, Q ให้คงที่ เมื่อสาย *อ่อน* (อิมพีแดนซ์สูง) การส่งกำลังเท่าเดิมผ่านสายอิมพีแดนซ์สูงทำให้ *แรงดันตกคร่อมสายมาก* $\Rightarrow$ แรงดัน PCC ตก (ในการจำลอง $|V|$ ตกจาก ~ 0.99 เหลือ ~ 0.79 pu)
2. แรงดันตกทำให้ *ดัชนีย่อยแรงดัน* พุ่งขึ้นทันที (พจน์เด่นสุด): $J_V = |V-1|/0.10$ จาก ~ 0.02 ขึ้นเป็น ~ 2.1
3. เมื่อกริดอ่อนลง จุดทำงานเข้าใกล้ *ขีดจำกัดกำลังสูงสุด (max-power / voltage-collapse nose)* และ พลวัต PLL ของ GFL *หน่วงน้อยลง* ทำให้เกิด transient ความถี่และ RoCoF $\Rightarrow J_f, J_R$ สูงขึ้น ด้วย (นี่คือปรากฏการณ์ weak-grid GFL instability ที่ทราบกันดี [3])
4. ผลรวมถ่วงน้ำหนัก AGSI จึงไต่ขึ้น *ชนเส้น* $\Gamma_{on} \Rightarrow$ สั่งสลับเป็น **GFM**

ทำไม GFM ช่วยได้: GFM เป็น *แหล่งแรงดัน* (voltage source behind impedance) ที่สร้างแรงดัน/ ความถี่อ้างอิงเองพร้อม virtual inertia จึงทำงานบนกริดอ่อนได้ หยุดการทรุดของแรงดัน และคืนเสถียรภาพ เมื่อสาย กลับสู่ปกติ (recovery) กริดกลับแข็งแรง GFL ก็ทำงานได้ดี อีกครั้ง AGSI ตกใต้ Γ_{off} จึงสลับกลับ GFL

2.3 กรอบ DAE ร่วม กระแสฉีด และกำลัง

แต่ละ IBR ใช้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์-พีชคณิต (DAE) แบบ input-driven ร่วมกัน

$$\dot{x} = f(x, y, u), \qquad 0 = g(x, y, u), \tag{1}$$

โดย x คือ *สถานะพลวัต* ของอุปกรณ์ (6 ตัว), $y = [\mathrm{Re}(V)\ \mathrm{Im}(V)]^T$ คือ *สถานะพีชคณิต* (แรงดัน บัส) และ $u = [P_{ref}\ Q_{ref}]^T$ คือ *อินพุตอ้างอิง* สมการ (1) หมายความว่า: แถวบน ($\dot{x} = f$) กำหนดว่าสถานะเปลี่ยนแปลงอย่างไรตามเวลา ส่วนแถวล่าง ($0 = g$) คือข้อจำกัดพีชคณิต (KCL ของ โครงข่าย) ที่ต้องเป็นจริงทุกขณะ

ขั้นตอนแปลงกรอบ dq ↔ เฟสเซอร์. กำหนดมุมอ้างอิงของอุปกรณ์ δ (GFL ใช้มุม PLL, GFM ใช้มุมโรเตอร์) แล้วฉายแรงดันเข้ากรอบ dq ทีละขั้น

$$V_{dq} = V\, e^{-j\delta}, \qquad v_d = \mathrm{Re}(V_{dq}), \quad v_q = \mathrm{Im}(V_{dq}), \tag{2}$$

กระแสฉีดสู่โครงข่าย (คืนค่าบน system base) แปลงกลับด้วย

$$I \;=\; \frac{(i_d + j\, i_q)\, e^{j\delta}}{\kappa}, \qquad \kappa = \frac{S_{base}}{M_{base}}, \tag{3}$$

โดย i_d, i_q คือกระแสในกรอบ dq (บน inverter base) และ κ คือตัวคูณเปลี่ยนฐาน (system/inverter) กำลังเชิงซ้อนที่ปลายทางคำนวณจากนิยามกำลังเฟสเซอร์ (generator convention)

$$S = V\,\overline{I}, \qquad P = \mathrm{Re}(S), \quad Q = \mathrm{Im}(S), \tag{4}$$

โดย $\overline{(\cdot)}$ คือสังยุค (complex conjugate) สมการ (3)–(4) จะถูกใช้ซ้ำ ในการพิสูจน์ความต่อเนื่องกระแส (§4)

2.4 ระบบทดสอบ: IBR สองตัวที่ PCC ร่วม + infinite bus

IBR สองตัว ($\mathtt{IBR1}$, $\mathtt{IBR2}$) เริ่มเป็น GFL ทั้งคู่ อยู่บัสเดียวกัน (PCC แรงดัน V) แล้วผ่าน สายส่ง Z_{line} สู่ infinite bus V_∞ (แรงดันคงที่)

ที่มาของสมการโครงข่าย (KCL) ทีละขั้น. ตามกฎกระแสของ Kirchhoff ที่โหนด PCC: ผลรวมกระแสที่ *ฉีดเข้า* โหนด ต้องเท่ากับกระแสที่ *ไหลออก* ทางสายส่ง กระแสในสายส่งหาได้จากกฎของ Ohm $I_{line} = (V - V_\infty)/Z_{line}$ ดังนั้น

$$\underbrace{I_1(x_1, V) + I_2(x_2, V)}_{\text{กระแสฉีดรวมจาก IBR}} \;=\; \underbrace{\frac{V - V_\infty}{Z_{line}}}_{\text{กระแสไหลออกทางสาย}} \tag{5}$$

สมการ (5) คือ $g(x, y, u) = 0$ ในกรอบ (1) สำหรับระบบนี้ (มีโหนดพีชคณิตเดียวคือ V) เขียนแยกส่วนจริง/จินตภาพได้สองสมการจริง

2.5 การหาสมดุลเริ่มต้นที่ PCC (ก่อนเหตุการณ์)

ก่อนเกิดเหตุการณ์ ระบบต้องอยู่ที่ *จุดสมดุล* (แบน ไม่มี transient) เราหาแรงดัน PCC เริ่มต้น V จาก สมดุลกำลัง โดยอนุมานทีละขั้น:

$$\text{กระแสสาย:} \quad I_{line} = \frac{V - V_\infty}{Z_{line}}, \tag{6}$$

$$\text{กำลังไหลออกสู่สาย:} \quad S_{line} = V\,\overline{I_{line}}, \tag{7}$$

$$\text{สมดุลที่ PCC (ฉีด = ไหลออก):} \quad S_1 + S_2 = S_{line} = V\,\overline{I_{line}}. \tag{8}$$

แทน (6) ใน (8) แล้วนำสังยุคทั้งสองข้าง ได้สมการเดียวสำหรับ V

$$\boxed{\overline{V}\,\frac{(V - V_\infty)}{Z_{line}} \;=\; \overline{S_1 + S_2}} \tag{9}$$

สมการ (9) *ไม่เป็นเชิงเส้น* และมีสังยุคของ V จึงแก้ด้วย **Newton บนตัวแปรจริงสองตัว** $\mathsf{v} = [\mathrm{Re}(V);\ \mathrm{Im}(V)]$: กำหนด residual $\mathsf{r}(\mathsf{v}) = [\mathrm{Re}(F);\ \mathrm{Im}(F)]$ โดย $F(V) = \overline{V}(V - V_\infty)/Z_{line} - \overline{S_{tot}}$ แล้ววนซ้ำ $\mathsf{v} \leftarrow \mathsf{v} - J^{-1}\mathsf{r}$ (Jacobian J จากผลต่างจำกัดกึ่งกลาง) จนกว่า $\|\mathsf{r}\|_\infty$ เล็กกว่า tolerance เมื่อได้ V แล้ว จึงตั้งสถานะเริ่มต้นของแต่ละ IBR จาก $\mathtt{equilibrium_initialize}(V, P_k, Q_k)$ และตรวจว่า residual ของ (5) และ f อยู่ระดับ machine precision (ผลจริง: $|\mathrm{KCL}| \sim 10^{-15}$)

2.6 คลาสอุปกรณ์สลับได้ (`SwitchableIbr6`)

อุปกรณ์แต่ละตัวห่อหุ้มแบบจำลองทั้งสองโหมด สถานะแอ็กทีฟ *มี 6 ตัวเสมอ* การสลับไม่เปลี่ยนขนาดเวกเตอร์ แต่ *re-initialise* 6 ช่องให้เป็นสมดุลของโหมดปลายทาง (§4) หน้าที่: (ก) ส่งต่อ $f,\ I$ ไปโหมดแอ็กทีฟ (ข) ประเมิน AGSI (ค) ถ่ายโอนโหมด

3 สมการการสลับ: ดัชนี AGSI และเส้นอ้างอิง

3.1 นิยามดัชนี AGSI

Adaptive Grid Stability Index รวมความเบี่ยงเบนที่วัดได้ ณ PCC สี่ปริมาณ ให้เป็นดัชนีไร้หน่วยเดียว

$$\boxed{\text{AGSI} \;=\; w_V J_V \;+\; w_f J_f \;+\; w_R J_R \;+\; w_P J_P} \tag{10}$$

ดัชนีย่อยแต่ละตัว *ทำ normalisation* ด้วยค่าฐานเฉพาะ (characteristic deviation)

$$J_V = \frac{|V - V_{ref}|}{\Delta V_{base}} \qquad \text{(ความเบี่ยงเบนแรงดัน)} \tag{11}$$

$$J_f = \frac{|f - f_0|}{\Delta f_{base}} \qquad \text{(ความเบี่ยงเบนความถี่)} \tag{12}$$

$$J_R = \frac{|\mathrm{d}f/\mathrm{d}t|}{\Delta \text{RoCoF}_{base}} \qquad \text{(อัตราการเปลี่ยนความถี่, RoCoF)} \tag{13}$$

$$J_P = \frac{|P_{ref} - P|}{\Delta P_{base}} \qquad \text{(ความคลาดเคลื่อนกำลังจริง)} \tag{14}$$

และน้ำหนักรวมเป็นหนึ่ง $w_V + w_f + w_R + w_P = 1$ ค่าที่ใช้เป็น default (แนวทางจาก §4.1 ของ [1]) สรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: พารามิเตอร์ของสมการ AGSI และเกณฑ์การสลับ (default)

กลุ่ม	สัญลักษณ์	ค่า default
น้ำหนัก	$w_V,\ w_f,\ w_R,\ w_P$	$0.30,\ 0.30,\ 0.25,\ 0.15$
ค่าฐาน normalisation	ΔV_{base}	0.10 pu
	Δf_{base}	0.50 Hz
	$\Delta \text{RoCoF}_{base}$	1.00 Hz/s
	ΔP_{base}	0.20 pu
อ้างอิง	$V_{ref},\ f_0$	1.0 pu, 60 Hz
เส้นเกณฑ์	Γ_{on} (ขึ้น GFM)	0.65
	Γ_{off} (ลง GFL)	0.35
เวลาหน่วง	$T_{d,on},\ T_{d,off}$	0.10 s, 1.00 s

3.2 ความหมายของแต่ละพจน์

สมการ (10) รวม *ความเบี่ยงเบนของสภาวะกริดสี่ด้าน* ที่วัดได้ ณ PCC โดยแต่ละพจน์บอก “มุมมองความเครียด” คนละแบบ

- **AGSI** — ดัชนีเสถียรภาพรวม (ไร้หน่วย) ยิ่งสูงยิ่งเครียด/เข้าใกล้ไม่เสถียร ใช้เป็นตัวเดียว ในการตัดสินสลับโหมด

- $J_V = |V - V_{ref}|/\Delta V_{base}$ — **ดัชนีย่อยแรงดัน.** V คือขนาดแรงดันที่ PCC เทียบค่าปกติ $V_{ref} = 1.0$ pu กริดอ่อน/โหลดหนักทำแรงดันตก $\Rightarrow$ J_V สูง (ในระบบเรานี่คือ *ตัวขับหลัก*) ค่าฐาน $\Delta V_{base} = 0.10$ pu (เพี้ยน $10\% \Rightarrow J_V = 1$)
- $J_f = |f - f_0|/\Delta f_{base}$ — **ดัชนีย่อยความถี่.** f ในโหมด GFL มาจาก PLL, ในโหมด GFM มาจากความถี่โรเตอร์เสมือน VSG เทียบพิกัด $f_0 = 60$ Hz บ่งชี้ *ความไม่สมดุลกำลัง*/แนวโน้ม หลุด synchronism ค่าฐาน $\Delta f_{base} = 0.50$ Hz
- $J_R = |\mathrm{d}f/\mathrm{d}t|/\Delta\mathrm{RoCoF}_{base}$ — **ดัชนีย่อย RoCoF.** อัตราการเปลี่ยนความถี่ เป็นดัชนีมาตรฐานของความเฉื่อยระบบ ระบบ IBR สูง (inertia ต่ำ) มี RoCoF *ใหญ่* หลังการรบกวน อันตรายต่อเสถียรภาพความถี่ [7] $\Rightarrow$ ควรสลับเป็น GFM ที่ให้ virtual inertia ค่าฐาน $\Delta\mathrm{RoCoF}_{base} = 1.0$ Hz/s (ระดับเกณฑ์ทนทาน RoCoF ของ grid code ~ 0.5–2 Hz/s)
- $J_P = |P_{ref} - P|/\Delta P_{base}$ — **ดัชนีย่อยความคลาดกำลัง.** เทียบกำลังที่ *สั่ง* กับที่ *ฉีดจริง* คลาดมากบ่งชี้ตัวแปลง *ส่งกำลังตามคำสั่งไม่ไหว* ค่าฐาน $\Delta P_{base} = 0.20$ pu
- w_V, w_f, w_R, w_P **(รวม** $= 1$**).** น้ำหนักความสำคัญแต่ละด้าน default $0.30/0.30/0.25/0.15$ (เน้น แรงดัน+ความถี่มากสุด) ในต้นฉบับปรับด้วย BO ที่นี่ตรึงเป็นแนวทาง
- **ค่าฐาน normalisation.** ทำให้ดัชนีย่อยไร้หน่วยและเทียบกันได้: เบี่ยงเบนเท่าค่าฐาน $\Rightarrow$ ดัชนีย่อย $= 1$ (เหมือน "เพี้ยนกี่เท่าของค่าที่ยอมรับ")
- $\Gamma_{on} = 0.65,\ \Gamma_{off} = 0.35$ — **เส้นอ้างอิง.** เกณฑ์บน/ล่างของ AGSI
- GRA $\in \{0, 1\}$. ความพร้อมแหล่งอ้างอิงกริด ($1 =$ มี infinite bus/GFM; $0 =$ สูญเสีย/ แยกเกาะ $\Rightarrow$ บังคับ GFM)
- $T_{d,on} = 0.10$ s, $T_{d,off} = 1.0$ s. เวลาหน่วงที่เงื่อนไขต้องคงอยู่ต่อเนื่องก่อนสลับ

3.3 อัลกอริทึมการคำนวณ AGSI (ทีละขั้น)

ทุกสเต็ปเวลา t_n คำนวณ AGSI ดังนี้:

1. อ่านสถานะโหมดปัจจุบัน แล้ว reconstruct: แรงดัน V (จาก y), ความถี่ f, กำลังจริง $P = \mathrm{Re}(V\overline{I})$
2. $J_V = |V|$ ต่างจาก V_{ref} หารด้วย ΔV_{base} ตาม (11)
3. J_f ตาม (12)
4. **RoCoF เชิงตัวเลข:** $\dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \approx \dfrac{f(t_n) - f(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}}$ โดยใช้ความถี่ของ *สเต็ปก่อนหน้า* (f_{prev}) ที่บันทึกไว้ (อัปเดตครั้งเดียวต่อสเต็ปเพื่อไม่ให้ค่า ผิดเพี้ยนจากการเรียกซ้ำ) แล้วได้ J_R ตาม (13)
5. J_P จาก $P_{ref} = u(1)$ เทียบ P ตาม (14)
6. รวมถ่วงน้ำหนักตาม (10)

3.4 เกณฑ์การสลับ (index ทำงานอย่างไร)

กำหนด GRA $\in \{0, 1\}$ การตัดสินใจ (ทีละขั้น):

1. **ประเมิน** AGSI ตาม §3.3 ทุกสเต็ป

2. **เงื่อนไขสลับขึ้น (GFL→GFM):**

$$\left(\text{AGSI} \geq \Gamma_{on}\right) \ \vee \ \left(\text{GRA} = 0\right) \quad \text{คงอยู่ต่อเนื่อง} \ \geq T_{d,on} \tag{15}$$

คือดัชนี *ชนเส้นบน* Γ_{on} (เครียด) *หรือ* สูญเสียแหล่งอ้างอิง และคงอยู่ครบ $T_{d,on}$

3. **เงื่อนไขสลับลง (GFM→GFL):**

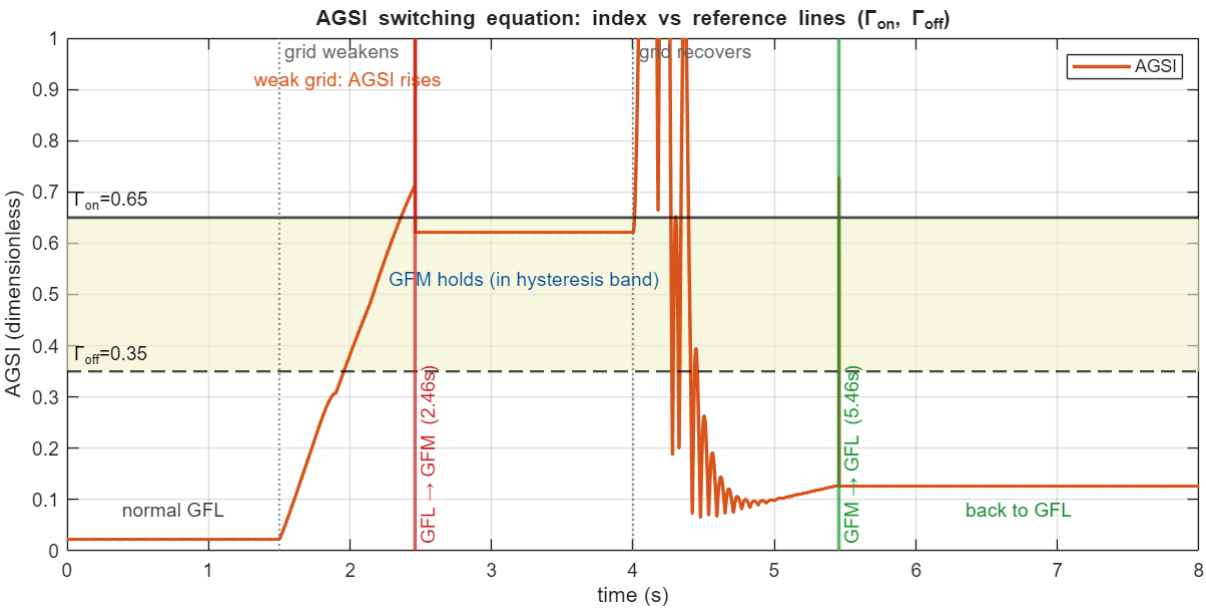
$$\left(\text{AGSI} < \Gamma_{off}\right) \ \wedge \ \left(\text{GRA} = 1\right) \quad \text{คงอยู่ต่อเนื่อง} \ \geq T_{d,off} \tag{16}$$

คือดัชนี *ตกใต้เส้นล่าง* Γ_{off} (สงบ) *และ* มีแหล่งอ้างอิง และคงอยู่ครบ $T_{d,off}$

หมายเหตุ (โหมด default = ขับด้วยดัชนีล้วน, per-IBR). โดย default การสลับ *ขับด้วย AGSI เทียบ เส้นเกณฑ์เท่านั้น* (ปิดเงื่อน GRA): เมื่อสูญเสียแหล่งอ้างอิง เช่น SG หลุดในระบบหลายเครื่อง *ไม่ได้บังคับ ให้ IBR ทุกตัวเป็น GFM* แต่เฉพาะ IBR ที่เครียดจน AGSI *แตะเส้น* Γ_{on} เท่านั้นที่สลับ ดัชนีจึง *เลือกชุด GFM ขั้นต่ำที่จำเป็น* ให้เองตามสภาพจริงของแต่ละตัว ส่วนเงื่อน GRA แบบบังคับใน สมการ (15)–(16) เป็น *ตัวเลือกเสริม* (`gra_override`, ปิดไว้เป็นค่าเริ่มต้น) ตามรูปแบบดั้งเดิมของ EECON49 นอกจากนี้ในการศึกษานี้ตั้ง *ไม่มีเวลาหน่วง* ($T_{d,on} = T_{d,off} = 0$) เพื่อ ดูการสลับแบบทันที (ดู §3.5: AGSI++ ทำให้การสลับทันทีไม่สั่น โดยไม่ต้องพึ่ง dwell)

กลไกเวลาหน่วง (dwell) ทีละขั้น. เก็บเวลา t_{since} ที่เงื่อนไขเริ่มเป็นจริง: ถ้าเงื่อนไขเป็นจริง และ t_{since} ยังไม่ถูกตั้ง ให้ตั้ง $t_{since} = t$; ถ้าเงื่อนไขเป็นเท็จ ให้รีเซ็ต $t_{since} =$ ว่าง; จะสลับก็ต่อเมื่อ $t - t_{since} \geq T_d$ (และเวลาที่อยู่ในโหมดปัจจุบัน $\geq T_d$) กลไกนี้ทำให้ *spike ชั่วขณะ* (เช่น RoCoF พุ่งตอนกริดคืน) ไม่ทำให้สลับ เพราะไม่ "คงอยู่" ครบเวลา

ฮิสเทอรีซิส. เนื่องจาก $\Gamma_{on} > \Gamma_{off}$ เกิด *แถบ* $[\Gamma_{off}, \Gamma_{on}]$ ที่ *ไม่มีการสลับ* เมื่อ AGSI อยู่ในแถบ ป้องกันการสลับไปมาถี่ ๆ ดูรูปที่ 1



รูปที่ 1: สมการดัชนี AGSI เทียบเส้นอ้างอิง $\Gamma_{on} = 0.65$ (ทึบ) และ $\Gamma_{off} = 0.35$ (ประ) แถบ เหลืองคือช่วงฮิสเทอรีซิส ดัชนีไต่ขึ้นชน Γ_{on} แล้วสลับเป็น GFM (เส้นแดง) ค้างในแถบระหว่างกริดอ่อน จากนั้นเมื่อกริดคืน ตกใต้ Γ_{off} แล้วสลับกลับ GFL (เส้นเขียว)

3.5 AGSI++ : ส่วนขยายที่นำมาใช้เป็นหลัก

AGSI เดิม (§3) เป็นรูปสมการของ EECON49-P4 พอดี ในรายงานนี้ปรับปรุงเป็น **AGSI++** โดยเพิ่มสามส่วนที่ทำให้ "ดีกว่าเดิม" สำหรับการสลับบนกริดอ่อนจริง

$$\text{AGSI}^{++} = w_V J_V + w_f J_f + w_R J_R^{\text{filt}} + w_P J_P + w_{SCR} J_{SCR} + w_{lock} J_{lock} \tag{17}$$

โดยน้ำหนัก (รวม $= 1$) default คือ $[w_V, w_f, w_R, w_P, w_{SCR}, w_{lock}] = [0.25, 0.25, 0.15, 0.10, 0.15, 0.10]$ สามส่วนที่เพิ่ม:

1. **Filtered RoCoF (J_R^{filt}).** แทน RoCoF ดิบด้วยค่าผ่าน low-pass อันดับหนึ่ง

$$\text{RoCoF}_n^{\text{filt}} = \text{RoCoF}_{n-1}^{\text{filt}} + \alpha\left(\text{RoCoF}_n^{\text{raw}} - \text{RoCoF}_{n-1}^{\text{filt}}\right), \quad \alpha = \min\left(1, \frac{\Delta t}{\tau_R}\right), \ \tau_R = 0.05 \text{ s} \tag{18}$$

   กำจัด spike หนึ่ง-แซมเปิลตอนเปลี่ยนโครงสร้าง (ต้นเหตุของ chattering เมื่อไม่มี dwell)

2. **ดัชนีความแข็งแรงกริด (J_{SCR}).** วัด *ต้นเหตุ* (กริดอ่อน) โดยตรง

$$J_{SCR} = \max\left(0, \frac{\text{SCR}_{crit}}{\text{SCR}} - 1\right), \qquad \text{SCR} = \frac{|V_\infty|^2}{|Z_{line}|\, S_{agg}}, \ \text{SCR}_{crit} = 3 \tag{19}$$

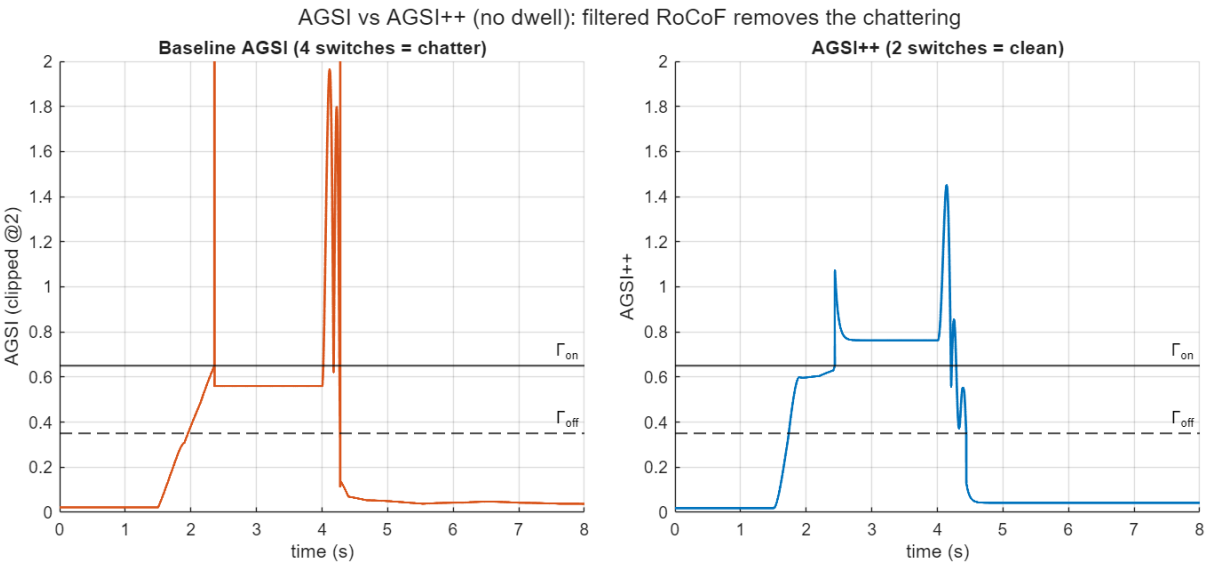
   เมื่อ SCR ตกใต้เกณฑ์อ่อน J_{SCR} เป็นบวก (งานนี้คำนวณ SCR จากโครงข่ายที่ทราบ = diagnostic; ระบบจริง ประมาณจาก $\mathrm{d}V/\mathrm{d}I$)

3. **ดัชนีหลุด-ล็อกของ PLL ($J_{lock} = |v_q|/\Delta v_{q,base}$).** แรงดันแกน q ในเฟรม PLL (ปกติ ≈ 0) เป็นตัวชี้ "หลุด lock" โดยตรงของ GFL

ผลเทียบบนระบบ 2-IBR (เหตุการณ์เดียวกัน). ตารางที่ 2 และรูปที่ 2: **AGSI++ สลับสะอาด (2 ครั้ง/ตัว) โดยไม่ต้องมี dwell** ส่วน AGSI เดิมแบบไม่มี dwell *สั่น (chatter, 4 ครั้ง)* เพราะ RoCoF spike (AGSI พุ่งถึง ~ 38) การกรอง RoCoF ทำให้ AGSI++ สูงสุดเพียง ~ 1.5 จึงนำ AGSI++ มาเป็น *ดัชนีหลัก*

ตารางที่ 2: เทียบ AGSI เดิม กับ AGSI++ บนระบบ 2-IBR (กริดอ่อน $\times 4$, ramp 0.4 s)

กรณี	ครั้งสลับ/ตัว	max AGSI	สรุป
AGSI เดิม, ไม่มี dwell	4	37.75	สั่น (chatter) จาก RoCoF spike
AGSI เดิม, มี dwell	2	24.97	สะอาด แต่ต้องพึ่ง dwell + ช้ากว่า
AGSI++, ไม่มี dwell	**2**	**1.45**	**สะอาดโดยไม่ต้อง dwell**
AGSI++, มี dwell	2	1.55	สะอาด



รูปที่ 2: เทียบดัชนีแบบไม่มี dwell: (ซ้าย) AGSI เดิม พุ่งเกินสเกล (clip ที่ 2) สลับ 4 ครั้ง (chatter); (ขวา) AGSI++ (filtered RoCoF) มีขอบเขต (< 1.5) สลับสะอาด 2 ครั้ง

4 การถ่ายโอนแบบต่อเนื่องกระแส (bumpless transfer)

ขณะสลับที่เวลา $t^\star$ ทำทีละขั้น:

1. อ่านแรงดันปลายทาง V (จาก y) และกระแสฉีดปัจจุบันของโหมดเดิม $I^- = I_{\text{เดิม}}(x^-, V)$
2. คำนวณกำลัง ณ ขณะนั้น $S = V\,\overline{I^-}$, $P = \mathrm{Re}(S)$, $Q = \mathrm{Im}(S)$
3. ตั้งสถานะโหมดปลายทางให้เป็น *สมดุล* ที่ส่งมอบ (P, Q) เดิม ที่แรงดัน V เดิม ผ่าน `equilibrium_initialize`(V, P, Q)

พิสูจน์ความต่อเนื่องกระแส (ทุกขั้น). พิจารณาโหมด GFL: สมดุลกำหนด $i_{d0} = \kappa P/|V|$, $i_{q0} = -\kappa Q/|V|$, และมุม $\delta = \angle V$ แทนใน (3)

$$
\begin{aligned}
I^+ &= \frac{(i_{d0} + j\, i_{q0})\, e^{j\delta}}{\kappa} = \frac{\left(\frac{\kappa P}{|V|} - j\frac{\kappa Q}{|V|}\right) e^{j\angle V}}{\kappa} = \frac{(P - jQ)}{|V|}\, e^{j\angle V} \\
&= (P - jQ)\,\frac{V}{|V|^2} = \frac{P - jQ}{\overline{V}} = \overline{\left(\frac{P + jQ}{V}\right)} = \overline{\left(\frac{S}{V}\right)} = I^-.
\end{aligned} \tag{20}
$$

โดยใช้ $e^{j\angle V} = V/|V|$ และ $V/|V|^2 = 1/\overline{V}$ โหมด GFM ก็ให้ผลเดียวกัน (สมดุลตั้งจาก $I_{net} = \overline{(P + jQ)/V}$ โดยตรง) ดังนั้น *กระแสฉีดต่อเนื่องข้ามการสลับทั้งสองทิศ* (ไม่มีการกระโดดของกระแสในโครงข่าย) ผลทดสอบ: $|I^+ - I^-| \approx 2.8 \times 10^{-17}$

การ back-solve ค่าอ้างอิง GFM (ให้อนุพันธ์เป็นศูนย์ที่ขณะสลับ). สมการแรงดัน GFM มี $\tau_E \dot{E} = k_Q(Q_{ref} - Q) - k_E(E - |V|)$ ต้องการ $\dot{E} = 0$ ที่ขณะสลับ (โดย E_0 คือค่าเริ่มต้น ที่ตั้งไว้) จึงแก้หา

$$
k_Q(Q_{ref} - Q) = k_E(E_0 - |V|) \;\Rightarrow\; Q_{ref} = Q + \frac{k_E\,(E_0 - |V|)}{k_Q\,\kappa}, \tag{21}
$$

และตั้ง $P_{ref} = P$ เพื่อให้สมการ swing ($M\dot{\omega} = P_{ref} - P - D_v(\omega - 1)$) มี $\dot{\omega} = 0$ ที่ $\omega = 1$ ดังนั้น GFM เริ่มที่สมดุลพอดี (bumpless เต็มรูป)

5 ตัวขับจำลองเชิงเวลา (TDS driver)

5.1 Implicit-trapezoidal คู่กับ KCL

รวมสถานะเป็น $z = [x_1;\ x_2;\ y]$ (มิติ $6 + 6 + 2 = 14$) การก้าวจาก t_n ไป $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ ใช้กฎ สี่เหลี่ยมคางหมูโดยปริยาย (implicit trapezoidal) สำหรับสถานะพลวัต คู่กับ KCL (5) เป็น residual

$$
\mathsf{r}(z_{n+1}) = \begin{bmatrix} x_{1,n+1} - x_{1,n} - \frac{\Delta t}{2}\big(f_1(x_{1,n}) + f_1(x_{1,n+1})\big) \\ x_{2,n+1} - x_{2,n} - \frac{\Delta t}{2}\big(f_2(x_{2,n}) + f_2(x_{2,n+1})\big) \\ g(x_{1,n+1}, x_{2,n+1}, V_{n+1}) \end{bmatrix} = \mathsf{0}. \tag{22}
$$

แถวสองบนคือสูตรคางหมู $x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{2}(f_n + f_{n+1})$ (อันดับสอง, A-stable) แถวล่างบังคับ KCL ที่ปลายสเต็ป แก้ (22) ด้วย **damped Newton**: วนซ้ำ $z \leftarrow z + \alpha\,\Delta z$ โดย $\Delta z = -J^{-1}\mathsf{r}$, $J = \partial\mathsf{r}/\partial z$ ประมาณด้วยผลต่างจำกัด, และ α ลด ครึ่งถ้าค่าไม่จำกัด จนกว่า $\|\mathsf{r}\|_\infty \le$ tolerance ผลจริง: ลู่เข้าทุกสเต็ป

5.2 เหตุการณ์กริดอ่อนชั่วคราวและ ramp เรียบ

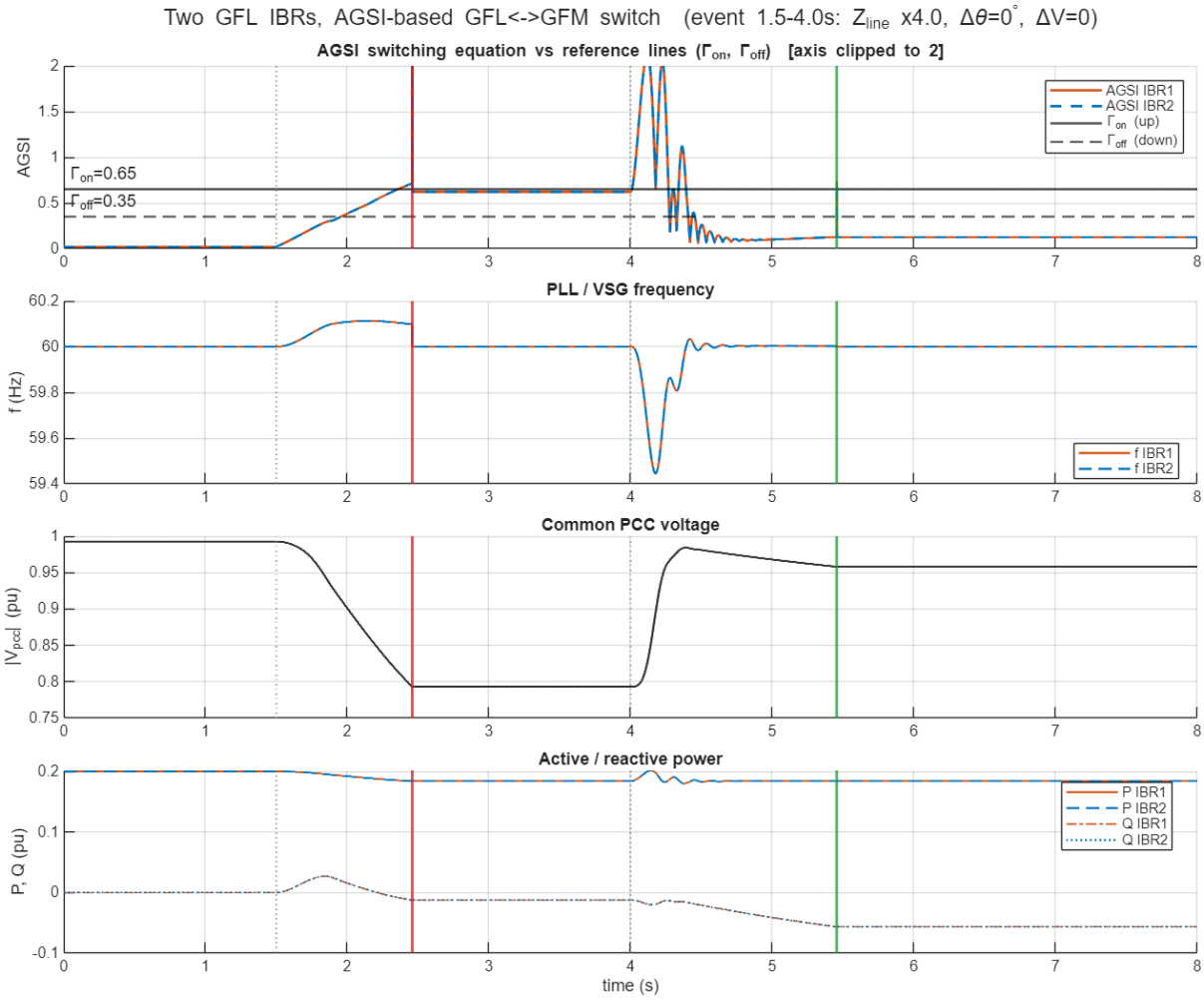
เหตุการณ์เข้าเฉพาะสมการพีชคณิต (ไม่แตะ f) ในช่วง $[t_{ev}, t_{rec}]$ อิมพีแดนซ์สายคูณแฟกเตอร์และ/หรือ V_∞ เปลี่ยน โดยใช้ตัวถ่วง *smooth-step* เพื่อเปลี่ยนอย่างเรียบ (RoCoF จำกัด)

$$s(u) = 3u^2 - 2u^3, \qquad u \in [0, 1], \tag{23}$$

โดย s ไต่จาก 0⟶1 ในช่วง ramp $[t_{ev}, t_{ev} + t_{ramp}]$ คงที่ 1 จนถึง t_{rec} แล้วไต่กลับ 1⟶0 ในช่วง $[t_{rec}, t_{rec} + t_{ramp}]$ แรงดัน/อิมพีแดนซ์เวลาใด ๆ คือ $V_\infty(t) = V_\infty + (V_{step} - V_\infty)\, s$ และ $Z_{line}(t) = Z_{line}\,[1 + (\text{factor} - 1)s]$ เมื่อจบแต่ละสเต็ป supervisor เรียกเงื่อนไข (15)–(16) ถ้าเข้าเงื่อนไขจึงถ่ายโอน แบบ §4 ตัวขับนี้เป็น `ASSUMED_DIAGNOSTIC` ใช้ code ในโครงการล้วน

6 ผลการจำลอง

รูปที่ 3 แสดงผลรวมสี่แผงของ scenario default (กริดอ่อน $\times 4$ ช่วง 1.5–4.0 s, ramp 0.4 s, ไม่มีเฟส snap):



รูปที่ 3: ผลรวมสี่แผง: (บน) AGSI เทียบเส้นอ้างอิง (เส้นแดง = GFL⟶GFM, เส้นเขียว = GFM⟶GFL) (ถัดมา) ความถี่ PLL/VSG, แรงดัน PCC, และกำลัง P, Q

ลำดับเหตุการณ์:

- **0–1.5 s:** GFL ปกติ AGSI ≈ 0.02 นิ่ง

- **1.5 s:** กริดอ่อน ($Z_{line} \times 4$) แรงดันตกแบบ S-curve, AGSI ไต่ขึ้น (นำโดย J_V)
- ≈ 2.46 **s:** AGSI ชน $\Gamma_{on} = 0.65 \Rightarrow$ สลับเป็น **GFM**
- **2.46–4.0 s:** GFM ประคองกริดอ่อน AGSI ค้างในแถบฮิสเทอรีซิส ความถี่กลับ 60 Hz
- **4.0 s:** กริดคืน แรงดันฟื้น transient สั้น ๆ (dwell กรอง)
- ≈ 5.45 **s:** AGSI ตกใต้ $\Gamma_{off} = 0.35 \Rightarrow$ สลับกลับ **GFL**
- > 5.45 **s:** GFL ปกติ AGSI ≈ 0.13

ยืนยันแล้ว: วงจรสลับสองทางครบ (`n_switch`$= 2$/ตัว จบที่ GFL); Newton ลู่เข้าทุกสเต็ป; กระแสต่อเนื่อง $\sim 2.8\times10^{-17}$ ทั้งสองทิศ; ความถี่แกว่ง ±0.6 Hz; สมดุลก่อนเหตุการณ์ residual machine precision; ทดสอบ `tests/test_ibr_switchable6.m` ผ่านทั้งหมด (รวมเส้นทาง `solve_case`)

7 วิธีรัน

- คำสั่งเดียว (เด้ง dialog ตั้งค่า): `run_two_ibr_switch`
- ข้าม dialog: `run_two_ibr_switch(Zline_factor=5)`
- ผ่าน launcher: `solve_case('analysis','ibr','case','two_ibr_switch')`

8 สรุปและข้อจำกัด

กลไกสลับ GFL↔GFM ด้วยสมการ AGSI ทำงานถูกต้องสองทาง โปร่งใส และต่อเนื่องกระแส ข้อจำกัด ที่ระบุตรงไปตรงมา: (1) น้ำหนัก/เกณฑ์เป็น `PROJECT_DERIVED_SOURCE_GUIDED` *ไม่ได้* ผ่าน Bayesian Optimization; (2) ที่ PCC ร่วม IBR สองตัวเห็นแรงดันเท่ากันจึงสลับพร้อมกัน (เฟสถัดไปควรแยกบัส+tie); (3) ตัวขับเป็น diagnostic ไม่ใช่ production TS kernel; (4) ยังไม่รวม current limiter/LVRT จึงเป็นหลักฐาน เชิงโครงสร้างของกลไก ไม่ใช่การรับรอง fault-ride-through

9 การศึกษาขยาย: การสลับโหมดอัตโนมัติบนระบบหลายเครื่องสองระบบ

ส่วนนี้ขยายการสาธิตแบบ PCC ร่วม ไปสู่ระบบหลายเครื่องสองระบบ ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (SG) หนึ่งเครื่องใช้โครงข่ายร่วมกับ IBR แบบ grid-following (GFL) หลายตัว เมื่อ SG ถูกปลด (trip) IBR ที่เครียด จะฟอร์มตัวเป็น GFM (GFL⟶GFM) เพื่อประคองเกาะ (island) และเมื่อ SG กลับเข้าระบบแบบซิงโครไนซ์ (reclose) SG จะรับหน้าที่ slack (มุมอ้างอิง) คืน แล้ว IBR ส่งการอ้างอิงกลับและกลับสู่โหมด GFL ตามแผนจ่าย การตัดสินใจใช้ supervisor เดียวกับ AGSI ที่ยกระดับเป็น **AGSI++** ในรายงานนี้

9.1 สมการดัชนีการสลับ AGSI / AGSI++ (ฉบับปรับปรุง)

ดัชนี Adaptive Grid-Support Index คือผลรวมถ่วงน้ำหนักของดัชนีย่อยที่ normalise แล้ว ประเมิน *ต่อ IBR ทุกสเต็ปเวลา* ดัชนีย่อยหกตัวคือ

$$J_V = \frac{|V - V_{ref}|}{\Delta V_{base}}, \qquad J_f = \frac{|f - f_0|}{\Delta f_{base}}, \tag{24}$$

$$J_R = \frac{|\mathrm{d}f/\mathrm{d}t|}{\Delta R_{base}}, \qquad J_P = \frac{|P_{ref} - P|}{\Delta P_{base}}, \tag{25}$$

$$J_{SCR} = \max\Big(0,\ \tfrac{SCR_{crit}}{SCR} - 1\Big), \qquad J_{lock} = \frac{|v_q|}{\Delta v_{q,base}}, \tag{26}$$

โดยค่าฐาน normalisation และค่าอ้างอิงคือ $\Delta V_{base} = 0.10$ pu, $V_{ref} = 1.0$; $\Delta f_{base} = 0.50$ Hz, $f_0 = 60$; $\Delta R_{base} = 1.0$ Hz/s (RoCoF); $\Delta P_{base} = 0.20$ pu; $SCR_{crit} = 3$ และ $\Delta v_{q,base} = 0.10$ ความหมายทีละพจน์: J_V คือความเบี่ยงเบนแรงดัน (ตัวขับหลัก เมื่อกริดอ่อน), J_f คือความเบี่ยงเบนความถี่ (บ่งชี้ความไม่สมดุลกำลัง), J_R คือ RoCoF (บ่งชี้ความเฉื่อยต่ำ), J_P คือความคลาดกำลังจริง (ตัวแปลงส่งกำลังตามคำสั่งไม่ไหว), J_{SCR} วัด *ต้นเหตุ* ความแข็งแรงของกริด โดยตรง (เป็นบวกเมื่อ SCR ต่ำกว่าเกณฑ์อ่อน), และ J_{lock} ใช้ $|v_q|$ เป็นตัวชี้การหลุด lock ของ PLL ดัชนีรวมคือ

$$\text{AGSI} = w_V J_V + w_f J_f + w_R J_R + w_P J_P + w_{SCR} J_{SCR} + w_{lock} J_{lock}. \tag{27}$$

น้ำหนัก: AGSI ธรรมดาใช้ $[w_V, w_f, w_R, w_P] = [0.30, 0.30, 0.25, 0.15]$ (และ $w_{SCR} = w_{lock} = 0$); ส่วน AGSI++ ใช้ $[w_V, w_f, w_R, w_P, w_{SCR}, w_{lock}] = [0.25, 0.25, 0.15, 0.10, 0.15, 0.10]$ (ผลรวม $= 1$) **เกณฑ์การสลับพร้อมฮิสเทอรีซิสและเวลาหน่วง (dwell):**

$$\text{GFL} \longrightarrow \text{GFM}: \quad \text{AGSI} \geq \Gamma_{on} = 0.65 \text{ คงอยู่ต่อเนื่อง } \geq T_{d,on}, \tag{28}$$

$$\text{GFM} \longrightarrow \text{GFL}: \quad \text{AGSI} < \Gamma_{off} = 0.35 \text{ คงอยู่ต่อเนื่อง } \geq T_{d,off}. \tag{29}$$

เนื่องจาก $\Gamma_{on} > \Gamma_{off}$ ช่วง $[\Gamma_{off}, \Gamma_{on}]$ จึงเป็นแถบฮิสเทอรีซิสที่ไม่มีการสลับ กันการสลับไปมาถี่ ๆ

ความแตกต่างสำคัญของ AGSI++: มีสามส่วน (๑) กรอง RoCoF ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง (low-pass, ค่าคงเวลา $\tau_R = 0.05$ s)

$$\text{RoCoF}_n^{\text{filt}} = \text{RoCoF}_{n-1}^{\text{filt}} + \alpha\Big(\text{RoCoF}_n^{\text{raw}} - \text{RoCoF}_{n-1}^{\text{filt}}\Big), \quad \alpha = \min\Big(1, \tfrac{\Delta t}{\tau_R}\Big), \tag{30}$$

เพื่อ *ปฏิเสธ spike RoCoF หนึ่งแซมเปิล* ที่เกิดตอนเปลี่ยนโครงสร้าง (trip/reclose) ซึ่งเป็นต้นเหตุของ การสั่น (chatter) เมื่อไม่มี dwell; (๒) เพิ่ม J_{SCR} ที่วัดความอ่อนของกริดโดยตรง; และ (๓) เพิ่ม J_{lock} ($|v_q|$) ที่จับการหลุด lock ของ PLL ทั้งสามส่วนช่วยให้ดัชนี *มีขอบเขตและไม่สั่น* (รายละเอียดผลใน §10)

9.2 แบบจำลอง IBR ลดรูป 6 states (ลำดับสถานะและสมการ)

แต่ละบล็อกหน้าที่ให้สองสถานะพลวัต อินพุตคือ $u = [P_{ref}; Q_{ref}]$ บน system base

GFL (grid-following) ลำดับสถานะ (6): $x = [\, i_d,\ i_q,\ \delta_{\text{PLL}},\ \xi_{\text{PLL}},\ \xi_P,\ \xi_Q \,]$ ได้แก่ กระแส dq ของ ตัวกรอง L (บน inverter base), มุม SRF-PLL (rad), ตัวปริพันธ์ PI ของ PLL, และตัวปริพันธ์ PI วงนอกของ P และ Q สมการทั้งหมดคือ

$$\dot{\delta}_{\text{PLL}} = k_{p,\text{PLL}} v_q + k_{i,\text{PLL}} \xi_{\text{PLL}}, \qquad \dot{\xi}_{\text{PLL}} = v_q, \tag{31}$$

$$\dot{\xi}_P = e_P = P_{ref} - P, \qquad \dot{\xi}_Q = e_Q = Q_{ref} - Q, \tag{32}$$

$$i_{d,ref} = k_{p,P} e_P + k_{i,P} \xi_P, \qquad i_{q,ref} = -(k_{p,Q} e_Q + k_{i,Q} \xi_Q), \tag{33}$$

$$\dot{i}_d = \frac{\omega L\, i_q - R_t i_d + v_{td} - v_d}{L/\omega_b}, \qquad \dot{i}_q = \frac{-\omega L\, i_d - R_t i_q + v_{tq} - v_q}{L/\omega_b}. \tag{34}$$

PLL ล็อกกับแรงดันโดยขับ $v_q \to 0$; วงนอก P, Q สร้างคำสั่งกระแส $i_{d,ref}, i_{q,ref}$; และ current plant เป็นแบบสัดส่วนพร้อมการ decouple (ωL) GFL จึงเป็น *แหล่งกระแส* ที่พึ่งการวัดแรงดันกริดผ่าน PLL

GFM (grid-forming, ไม่มี PLL) ลำดับสถานะ (6): $x = [\, i_d,\ i_q,\ \omega,\ \delta,\ E,\ \xi_V \,]$ ได้แก่ กระแส, ความเร็วโรเตอร์เสมือน (pu), มุมโรเตอร์ (rad), ขนาดแรงดันภายใน, และตัวปริพันธ์ PI แรงดันแกน d สมการคือ

$$\dot{\omega} = \frac{P_{ref} - P - D_v(\omega - 1)}{M}, \qquad \dot{\delta} = \omega_b(\omega - 1), \tag{35}$$

$$\dot{E} = \frac{k_Q(Q_{ref} - Q) - k_E(E - |V|)}{\tau_E}, \qquad \dot{\xi}_V = E - v_{gd}, \tag{36}$$

$$i_{q,ref} = -\big(k_{p,V}(E - v_{gd}) + k_{i,V}\xi_V\big), \qquad i_{d,ref} = k_{p,V}(-v_{gq}), \tag{37}$$

โดยความสัมพันธ์ที่ปลายทางเป็นแบบ *จับคู่ไขว้แกน (cross-paired)* คือ $v_{gd} = E + X i_q$ และ $v_{gq} = -X i_d$ VSG swing ให้ virtual inertia (สมการแรก) และวงแรงดันฟอร์มขนาดแรงดัน E เอง GFM จึงเป็น *แหล่งแรงดันหลังอิมพีแดนซ์* ที่ประคองกริดอ่อนได้ **ข้อควรรู้:** การจับคู่ไขว้แกนนี้จำเป็น เพราะ ถ้าจับคู่ *แกนเดียวกัน* (same-axis) วงแรงดันจะกลายเป็นป้อนกลับบวกและ *ไม่เสถียร* การจับคู่ไขว้ (E คุม v_{gd} ผ่าน i_q) จึงเป็นสิ่งที่ทำให้วงแรงดันเสถียร

9.3 คลาส SwitchableIbr6 และการถ่ายโอนแบบต่อเนื่องกระแส

อุปกรณ์ `SwitchableIbr6` หนึ่งตัวห่อหุ้มแบบจำลองลดรูป 6 states ทั้ง GFL และ GFM เป็น *แกนสมการ เดียว* (single source of truth) สถานะแอ็กทีฟ *มี 6 มิติเสมอ* การสลับโหมดเป็นแบบ *ต่อเนื่องกระแส (bumpless)*: โหมดปลายทางถูก re-initialise ให้ตรงกับปลายทาง (V, P, Q) ณ ขณะนั้น ทำให้กระแสฉีดต่อเนื่อง

$$I^+ = \overline{\left(\frac{S}{V}\right)} = I^-, \tag{38}$$

คือกระแสหลังสลับ (I^+) เท่ากับก่อนสลับ (I^-) พอดี (ไม่มีการกระโดดของกระแสในโครงข่าย) supervisor ของ AGSI (§ก่อนหน้า) ตัดสินการสลับ *ต่อ IBR* พร้อมฮิสเทอรีซิสและ dwell สำหรับการศึกษา SG trip/reclose: เมื่อ SG หลุด IBR ที่เครียดจน AGSI ข้าม Γ_{on} จะฟอร์มตัว (GFL⟶GFM); เมื่อ SG กลับเข้าแบบ ซิงโครไนซ์ SG รับ slack (มุมอ้างอิง) คืน แล้ว IBR ส่งการอ้างอิงกลับและกลับสู่แผนจ่าย GFL (ดัชนีเป็นตัวตัดสิน ว่า IBR ตัวใดจะกลับ)

9.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส: Padiyar model-1.1

ลำดับสถานะ $[\delta, \omega, E'_q, E'_d]$ สำหรับโหมด *manual* (สนามคงที่ ไม่มี AVR, 4 สถานะ) หรือ $[\delta, \omega, E'_q, E'_d, E_{fd}]$ สำหรับโหมด *avr* (5 สถานะ):

$$\dot{\delta} = \omega_B(\omega - 1), \tag{39}$$

$$\dot{\omega} = \frac{P_{m,\text{eff}} - T_e - D(\omega - 1)}{2H}, \qquad P_{m,\text{eff}} = P_m - \frac{\omega - 1}{R}, \tag{40}$$

$$\dot{E}'_q = \frac{E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d)I_d}{T'_{d0}}, \tag{41}$$

$$\dot{E}'_d = \frac{-E'_d + (X_q - X'_q)I_q}{T'_{q0}}, \tag{42}$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_A(V_{ref} - |V|) - E_{fd}}{T_A} \quad (\text{เฉพาะ avr}). \tag{43}$$

$P_{m,\text{eff}}$ รวมผลของ droop ของ governor ปฐมภูมิ ($R = \infty$ ปิดการทำงาน); ในโหมด manual $E_{fd} = E_{fd0}$ คงที่ การแก้ stator (พีชคณิต) คือ

$$r_d = V_d - E'_d, \qquad r_q = V_q - E'_q, \qquad \text{den} = R_a^2 + X'_d X'_q, \tag{44}$$

$$I_d = \frac{-R_a r_d - X'_q r_q}{\text{den}}, \qquad I_q = \frac{X'_d r_d - R_a r_q}{\text{den}}, \tag{45}$$

$$T_e = V_d I_d + V_q I_q + R_a(I_d^2 + I_q^2). \tag{46}$$

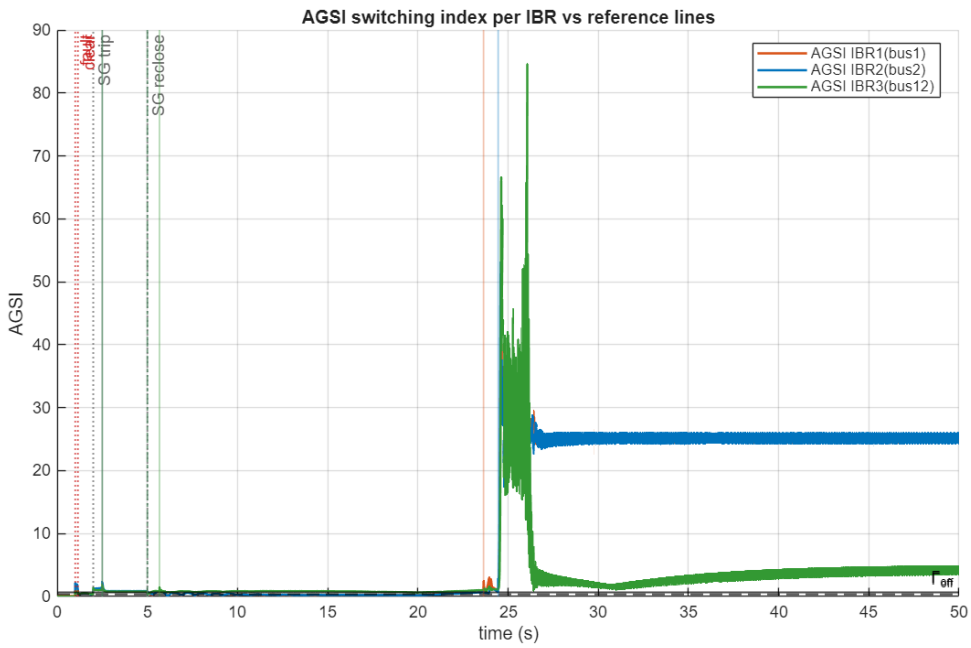
9.5 ระบบทดสอบสองระบบ

9.5.1 ระบบที่ 1: Padiyar two-area (จุดทำงานไม่เสถียร)

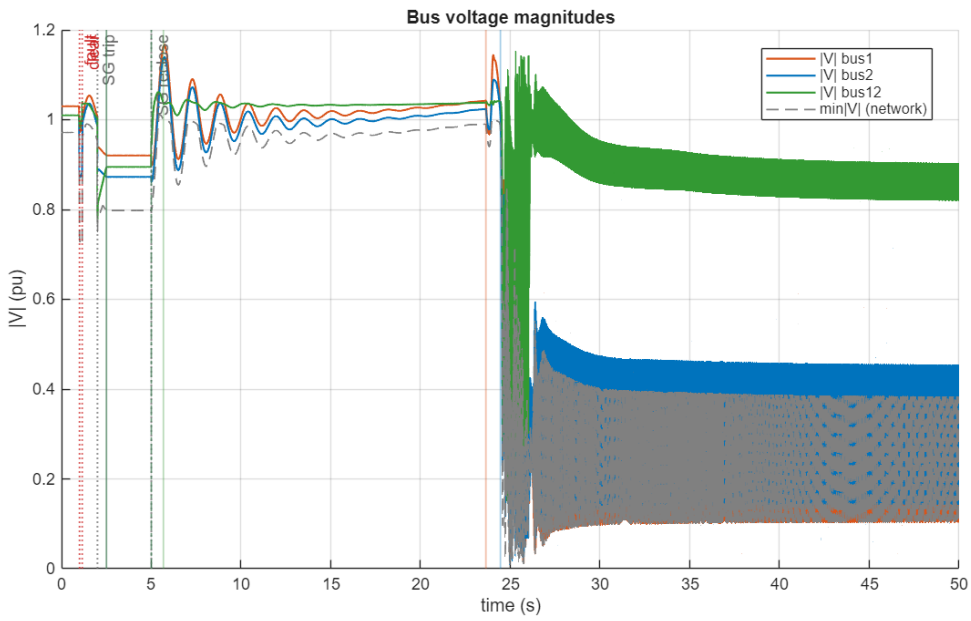
SG หนึ่งเครื่องที่บัส 11 (AVR, 5 สถานะ) ร่วมกับ GFL IBR สามตัวที่บัส 1, 2 และ 12 การวิเคราะห์สัญญาณเล็ก (SSSA) ของระบบรวมขณะ SG ออนไลน์: **23 สถานะ**, มี **ค่าเจาะจงในระนาบขวาหนึ่งค่า (RHP)**, max Re $= +0.058$ s^{-1} จึง *ไม่เสถียรเชิงสัญญาณเล็ก*; โหมดแกว่งที่หน่วงน้อยสุดมี $f = 0.677$ Hz, $\zeta = +0.12$ ลำดับการสลับ (ฟอลต์สามเฟสชั่วคราว $Z_f = j0.1$ pu ที่บัส 3 ช่วง 1.0–1.15 s จากนั้น SG trip ที่ 2 s และ reclose ที่ 5 s ในกรอบ 50 s):

1. ช่วง $[0, 1)$ s: SG เป็น slack; IBR ทั้งสามตัวเป็น GFL
2. ช่วง 1.0–1.15 s: ฟอลต์ชั่วคราว ($Z_f = j0.1$ pu); IBR ขี่ผ่านฟอลต์ในโหมด GFL
3. $t = 2$ s: SG หลุด; IBR ทั้งสามข้าม Γ_{on} และฟอร์มตัวเป็น GFM (เกิดเกาะ island)
4. $t = 5$ s: reclose แบบซิงโครไนซ์; SG รับหน้าที่ slack คืน และ IBR ส่งการอ้างอิงกลับ
5. $t \to 50$ s: เนื่องจากจุดทำงาน *ไม่เสถียร* โหมดช้าจึงโตขึ้นและระบบ *ทรุด* สู่สภาพ all-GFM ด้วย $V_{end} \approx 0.30$ pu

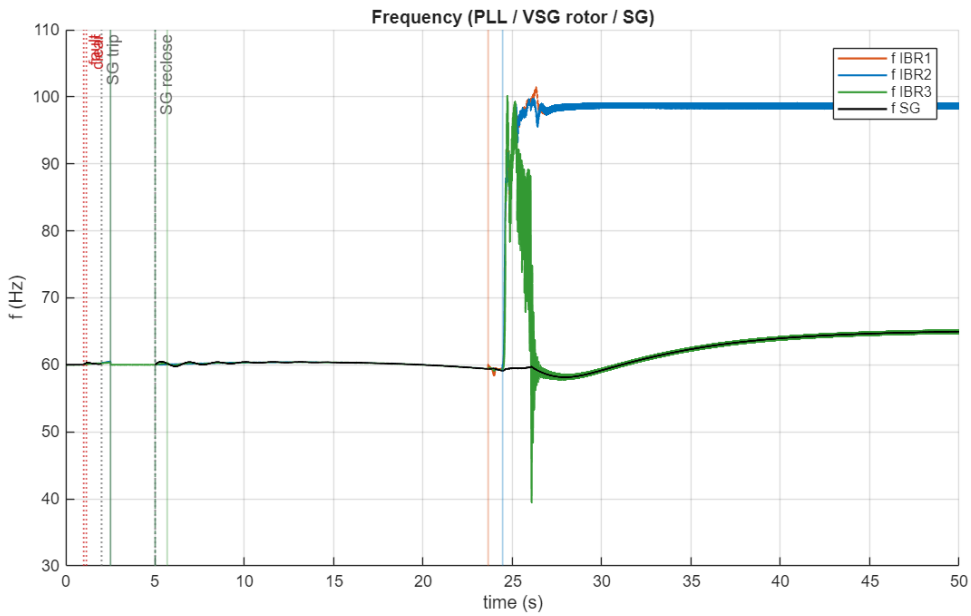
สังเกตว่าการดูผลในช่วงสั้น ๆ (เช่น < 10 s) เพียงอย่างเดียว “ดูเหมือนดี” แต่เป็นภาพลวง เพราะโหมดไม่เสถียรที่ช้ามากต้องใช้ เวลานานกว่าจะเผยตัว (ดู §10)



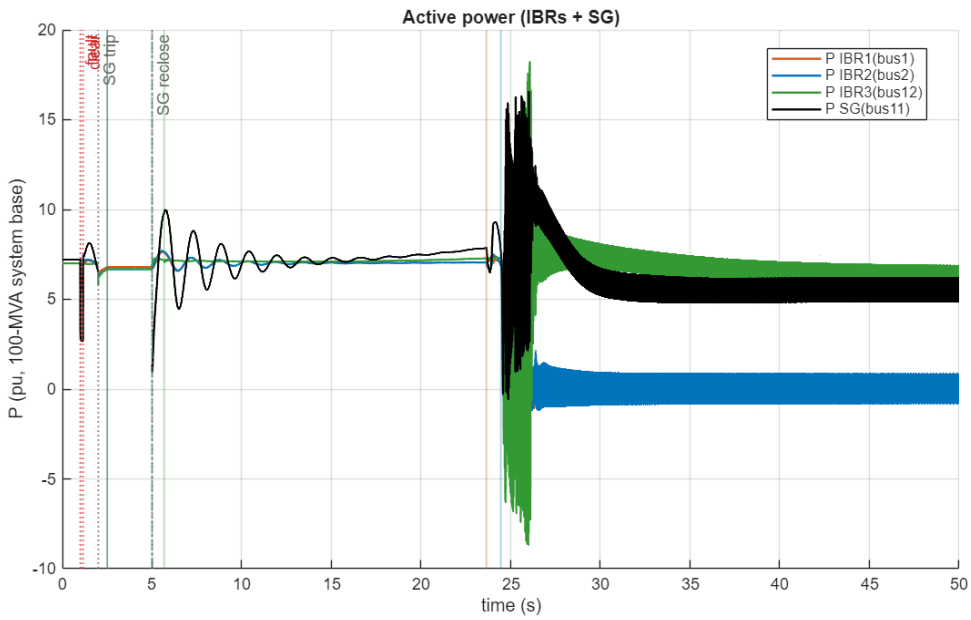
รูปที่ 4: Padiyar two-area: ดัชนี AGSI++ ต่อ IBR (ฟอลต์ $Z_f = j0.1$ pu แล้ว SG trip 2 s, reclose 5 s; กรอบ 50 s)



รูปที่ 5: Padiyar two-area: แรงดันบัสตลอดวงจร trip/reclose



รูปที่ 6: Padiyar two-area: ความถี่ของ SG และ IBR



รูปที่ 7: Padiyar two-area: กำลังจริงที่ฉีดเข้าระบบ

9.5.2 ระบบที่ 2: IEEE 14-bus (จุดทำงานเสถียร)

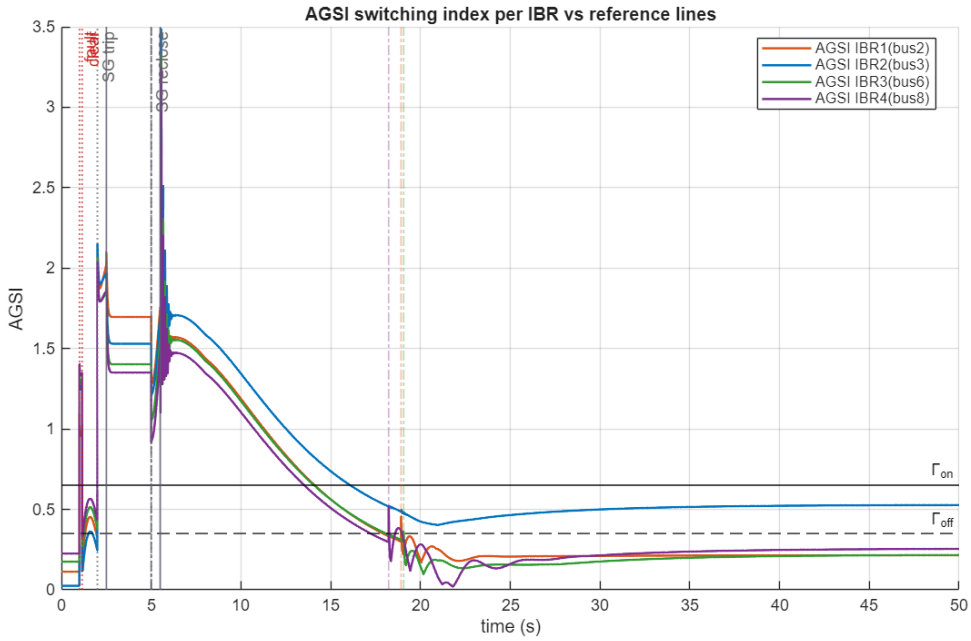
SG หนึ่งเครื่องที่บัส 1 (manual, ไม่มี AVR, 4 สถานะ) ร่วมกับ GFL IBR สี่ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 (ลดรูป 6) SSSA ของระบบรวม: **28 สถานะ, ไม่มีค่าเจาะจงในระนาบขวา (RHP = 0)**, max Re ≈ 0 (มีเพียงโหมดมุมอ้างอิงที่ ≈ 0); โหมดหน่วงน้อยสุดมี $f = 0.345$ Hz, $\zeta = +0.267$ จึง *เสถียรเชิงสัญญาณเล็ก* ลำดับการสลับ (ฟอลต์สามเฟสชั่วคราว $Z_f = j0.1$ pu ที่บัส 4 ช่วง 1.0–1.15 s จากนั้น SG trip ที่ 2 s และ reclose ที่ 5 s ในกรอบ 50 s):

1. ช่วง $[0, 1)$ s: SG เป็น slack; IBR ทั้งสี่ตัวเป็น GFL
2. ช่วง 1.0–1.15 s: ฟอลต์ชั่วคราว ($Z_f = j0.1$ pu); IBR ขี่ผ่านฟอลต์ในโหมด GFL

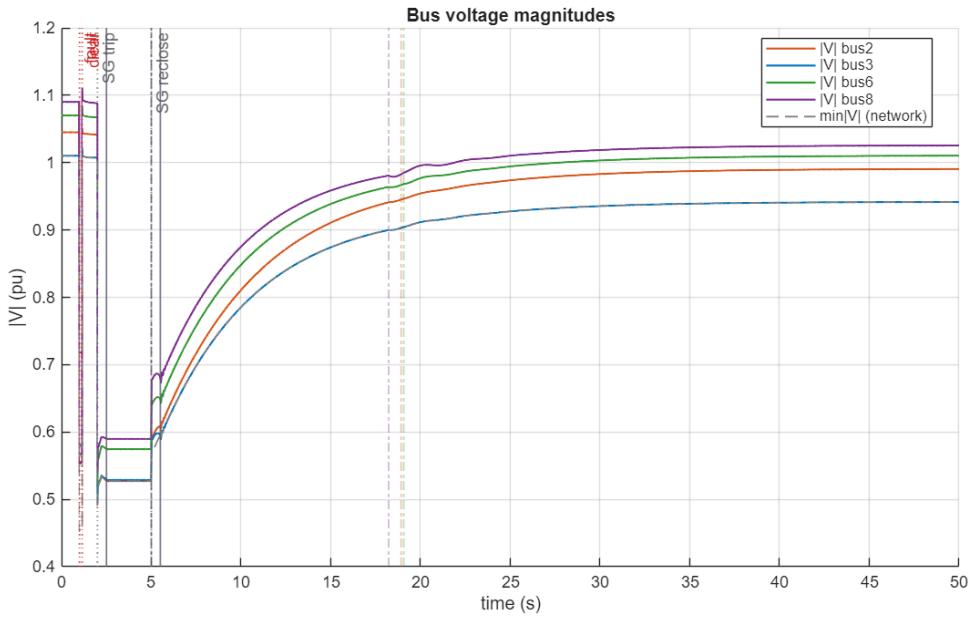
3. $t = 2$ s: SG หลุด; IBR ที่เครียดข้าม Γ_{on} และฟอร์มตัวเป็น GFM (เกาะอยู่รอด)

4. $t = 5$ s: reclose แบบซิงโครไนซ์; มุมอ้างอิงกลับสู่ SG

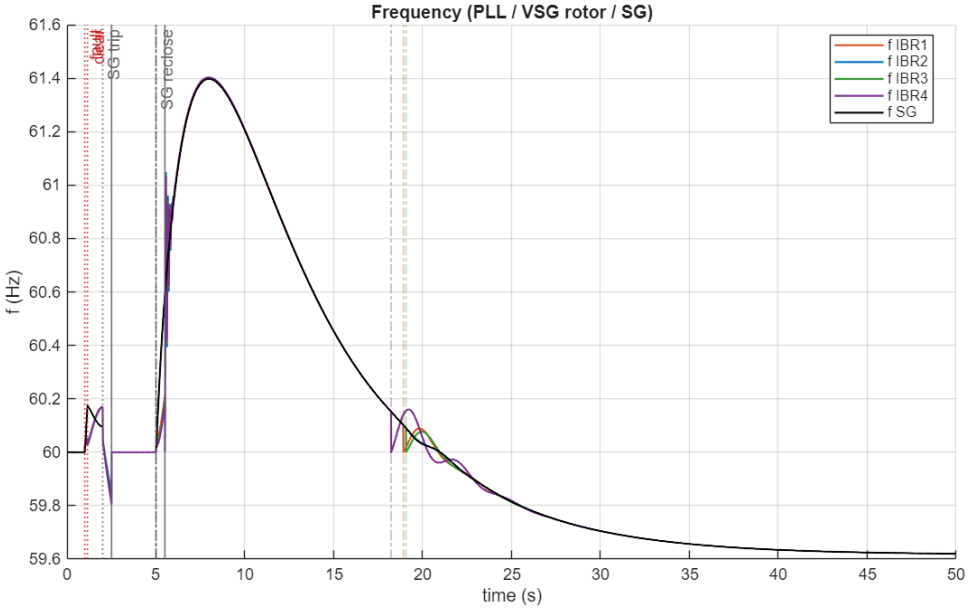
5. $t \to 50$ s: การตอบสนอง *มีขอบเขต* ($V_{end} \approx 0.94$ pu, IBR ส่วนใหญ่กลับสู่ GFL, AGSI มีขอบเขต ราว 3.5) แล้วนิ่งเข้าสู่สภาวะคงตัว



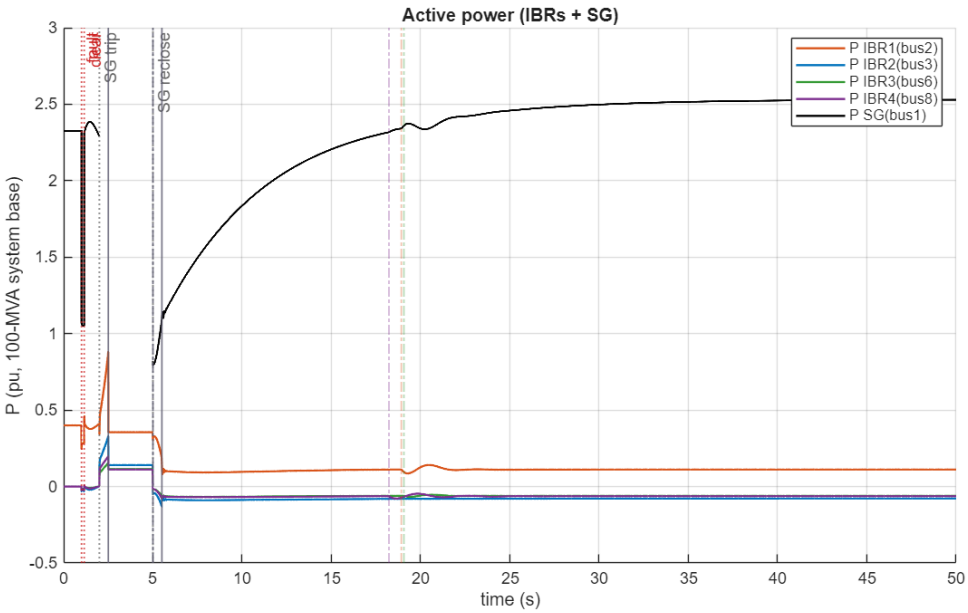
รูปที่ 8: IEEE 14-bus: ดัชนี AGSI++ ต่อ IBR (ฟอลต์ $Z_f = j0.1$ pu แล้ว SG trip 2 s, reclose 5 s; กรอบ 50 s)



รูปที่ 9: IEEE 14-bus: แรงดันบัสตลอดวงจร trip/reclose



รูปที่ 10: IEEE 14-bus: ความถี่ของ SG และ IBR



รูปที่ 11: IEEE 14-bus: กำลังจริงที่ฉีดเข้าระบบ

10 การวิเคราะห์เชิงลึก

10.1 ทำไม Padiyar two-area จึงไม่เสถียร แต่ IEEE 14-bus เสถียร

ความไม่เสถียรของ Padiyar two-area เป็น *โหมดช้า* (ค่าคงเวลาราว 17 s, สอดคล้องกับ $1/0.058 \approx 17.2$ s) ที่ถูกครอบงำโดย SG เป็นหลัก คือ *มุม/ความเร็วโรเตอร์* (δ, ω) ร่วมกับ *ฟลักซ์สนาม* (E'_q) แกว่งสวนทางกับกลุ่ม IBR *ผ่านสายเชื่อมสองพื้นที่ (tie-line) ที่อ่อน* และถูก ซ้ำเติมด้วยสัดส่วน GFL ที่ *สูงมาก* (เกิดปฏิสัมพันธ์ PLL–โครงข่ายในกริดเฉื่อยต่ำและอ่อน) จุดสำคัญคือ **ตัว SG เดี่ยว ๆ นั้นเสถียร**: เมื่อวิเคราะห์แบบ SMIB (เครื่องเดียวต่อบัสอนันต์) ได้ max Re $= -0.248$ (เสถียร) ดังนั้น *การคู่ควบผ่านโครงข่าย (network coupling)* ต่างหากที่ทำให้ไม่เสถียร ไม่ใช่ตัวเครื่องเอง

ในทางกลับกัน IEEE 14-bus เป็นโครงข่าย *ตาข่าย (meshed) พื้นที่เดียว* ที่ *ไม่มีสายเชื่อมระหว่าง พื้นที่ที่อ่อน* โหมดดังกล่าวจึง *แข็ง (stiff) และหน่วงดี* ระบบจึงเสถียร ข้อสรุปสำคัญ: นี่เป็น **ผลของโทโพโลยี (topology effect) ไม่ใช่ผลของ AVR** หลักฐานคือ Padiyar ไม่เสถียรทั้งเมื่อใช้ AVR (max Re $= +0.058$) และเมื่อใช้ manual (max Re $= +0.024$) กล่าวคือ ต่อให้ปิด AVR ระบบก็ยังไม่เสถียรจาก โครงสร้างสายเชื่อมที่อ่อนบวกกับ GFL penetration สูง

10.2 ประโยชน์ของ AGSI++

สามส่วนที่เพิ่มใน AGSI++ (RoCoF ที่กรองแล้ว + J_{SCR} + J_{lock}) ทำให้ดัชนี *มีขอบเขตและไม่สั่น* อย่างชัดเจน บนระบบ Padiyar ดัชนี AGSI ฐาน (baseline) พุ่งสูงถึงราว 262 พร้อมอาการสั่น (chatter) ในขณะที่ AGSI++ มีค่าสูงสุดเพียงราว 2.8; บน IEEE14 AGSI++ มีค่าสูงสุดราว 3.5 การกรอง RoCoF กำจัด spike หนึ่งแซมเปิลที่เกิดตอน trip/reclose (ต้นเหตุหลักของ chatter) ส่วน J_{SCR} และ J_{lock} ทำให้ดัชนีสะท้อน *ต้นเหตุ* (กริดอ่อน/PLL หลุด lock) แทนที่จะสะท้อนเพียงอาการชั่วขณะ ผลคือการตัดสินสลับสะอาดและเชื่อถือได้ แม้ตั้งค่าให้สลับทันที

10.3 ผลของเวลาหน่วง (dwell) เปิด/ปิด

ประเด็นนี้เป็นเหตุผลที่การศึกษานี้ *ต้องใช้ dwell*:

- **ไม่มี dwell ($T_d = 0$):** หลัง reclose ยอด AGSI ที่ *แตะ* Γ_{on} แบบเฉียดฉิว (marginal peak) เพียงชั่วขณะ ก็เพียงพอจะกระตุ้นการสลับ GFL⟶GFM *ซ้ำแบบผิดพลาด (spurious re-switch)* เมื่อใด ที่แหล่งจ่ายทั้งหมดกลายเป็นแบบ grid-forming (GFM หลายตัว + SG) พร้อมกันโดย *ไม่มี headroom ของขีดจำกัด กระแส* แรงดันจะ *ทรุดแบบหนีตัว (runaway/voltage collapse)*
- **มี dwell พอประมาณ ($T_{d,on} = 0.5$ s):** เงื่อนไขบังคับให้ AGSI ต้อง *คงอยู่เหนือ* Γ_{on} ต่อเนื่องครบ 0.5 s ก่อนจึงสลับ ซึ่ง *กรองยอดชั่วขณะ* ทิ้งไป ทำให้ IBR *ยังคงเป็น GFL* หลัง reclose และทรานเซียนต์หลัง reclose จึง *มีขอบเขต*

กล่าวโดยสรุป dwell ทำหน้าที่เป็นตัวกรองเชิงเวลาที่แยก “ยอดชั่วขณะที่ไม่อันตราย” ออกจาก “ภาวะเครียดจริงที่ คงอยู่” จึงป้องกันการสลับซ้ำผิดพลาดที่นำไปสู่การทรุดของแรงดัน นี่คือเหตุผลเชิงวิศวกรรมที่การศึกษานี้เลือกใช้ เวลาหน่วง

เอกสารอ้างอิง

[1] EECON49-P4 (KMITL), “A Bayesian Optimization-Based GFL/GFM Mode Switching Strategy,” The 49th Electrical Engineering Conference (EECON-49), 2569.

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

[3] P. Liu, X. Xie, and J. Shair, “Adaptive hybrid grid-forming and grid-following control of IBRs with enhanced small-signal stability under varying SCRs,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 6, pp. 6603–6607, 2024.

[4] X. Gao, D. Zhou, A. Anvari-Moghaddam, and F. Blaabjerg, “Seamless switching method between grid-following and grid-forming control for renewable energy conversion systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 61, no. 1, pp. 597–606, 2025.

[5] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Wiley-IEEE Press, 2010.

[6] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley-IEEE Press, 2011.

[7] ENTSO-E, “Rate of Change of Frequency (RoCoF) withstand capability,” Network Code RfG implementation guidance document, 2018.