# การสลับโหมด GFL↔GFM บน IEEE 14 บัสด้วย AGSI++

ผลจำลอง production all-KCL ครบ 200 วินาทีและการคืน reference ให้ SG

6 สิงหาคม 2569


**บทคัดย่อ**

รายงานนี้ใช้ข้อมูล operating case และลำดับเหตุการณ์จากไฟล์ตัวอย่าง `docs/text/EECON49_[Nui].pdf` เท่านั้น แต่สมการ ตัวแก้ power flow ตัวแก้สมการเชิงเวลา AGSI++ และกลไก switching เป็นโค้ดของโครงการทั้งหมด ระบบประกอบด้วย synchronous generator (SG) แบบ EMF6 จำนวนหก state ที่บัส 1 และ IBR แบบ dual-mode full-state สี่ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 การรัน production เดียวครอบคลุม 0–200 s: ปลด SG ที่ 20 s, เพิ่มโหลด 20% ที่ 50 s, fault สามเฟสที่บัส 9 ช่วง 85–85.15 s, เปิดสาย 6–13 ที่ 110 s, คืนสาย/โหลดและขอปิด SG ที่ 145 s ผลผ่านถึง 200 s โดย residual สูงสุดของ accepted step เท่ากับ $9.99 \times 10^{-9}$ และ subdivision สูงสุดหนึ่งชั้น SG ผ่าน synchronism guard และปิดจริงที่ 146.825 s จากนั้น coordinated SG-reference handback สั่ง IBR ทั้งหมดกลับ GFL ที่จุดสิ้นสุด 200 s ความถี่ SG กลับสู่ $60.0002$ Hz แสดงว่าความถี่กลับเข้าสู่ steady ก่อนจบ แม้บัสโหลดระยะไกลห้าบัสจะยังต่ำกว่าแบนด์แรงดัน $\pm 5$% เล็กน้อย ฉะนั้น chronology และ handback ทำงานตามสัญญาที่ประกาศ แต่ยังไม่ใช่การยืนยัน controller ระดับใช้งานจริง ไม่มี Bayesian Optimization (BO) ในงานนี้ ส่วน ripple เส้นจุดที่เห็นในกราฟเป็น display-only overlay แบบ band-limited; เส้นทึบยังเป็น raw result และ overlay ไม่เปลี่ยน state, AGSI, timer, threshold หรือผลตัดสินโหมด


## สารบัญ


1 คำตอบตรงตาม feedback 2

2 ขอบเขต case และ operating point 2

2.1 ผล power flow ของบัสและสายส่ง . . . 3

3 AGSI++: สมการและความหมายของตัวแปรทุกตัว 5

4 State machine และความแตกต่างระหว่าง index กับ override 6

5 สมการ state ของ SG และ IBR 6

5.1 SG แบบ operational EMF6 หก state . . . 6

5.2 governor/turbine เพิ่มเติมโดยไม่เปลี่ยนลำดับ EMF6 . . . 6

5.3 IBR dual-mode full-state . . . 7

6 ลำดับเหตุการณ์ 200 วินาทีและหลักฐาน transaction 8

7 กราฟ AGSI, mode, SG และ IBR ครบ 200 วินาที 11

8 ผล recovery ที่ตรวจได้และสิ่งที่ยังกล่าวไม่ได้ 13

9 สรุปหลายเหตุการณ์ที่มีหลักฐาน 14

10 ข้อจำกัดของ model และวิธีตอบหากถูกถาม 14

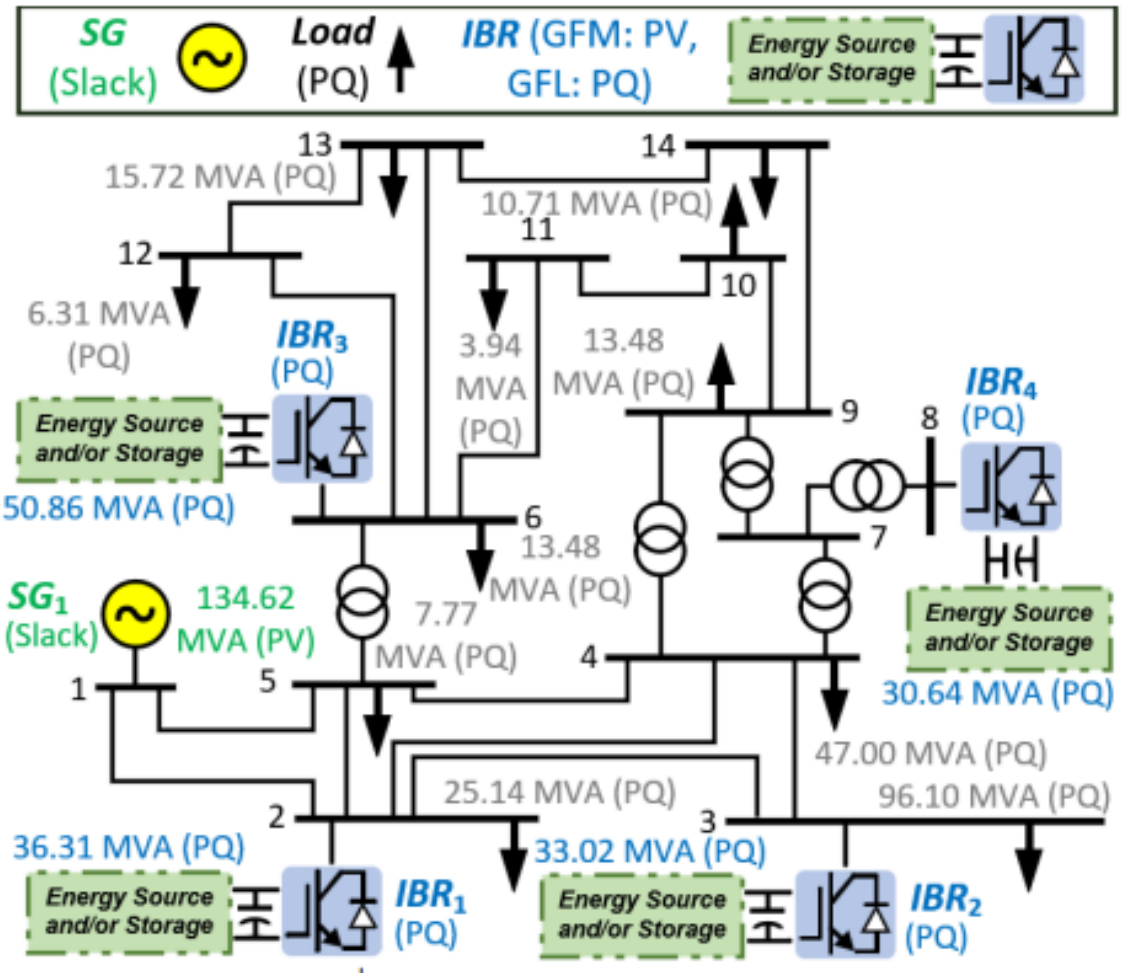
11 การสร้างซ้ำและสถานะการตรวจสอบ 14

# 1 คำตอบตรงตาม feedback

| คำถาม | คำตอบที่ตรวจจากโค้ดและผล 200 s |
|---|---|
| รู้ได้อย่างไรว่า IBR อยู่โหมดใด | อ่าน committed mode ของอุปกรณ์โดยตรง ไม่อนุมานจากกราฟกำลัง: 0=GFL และ 1=GFM รูป mode timeline รวมของ IBR1–IBR4 จึงเป็นหลักฐานหลัก |
| สลับด้วยวิธีใด | โครงสร้างทั่วไปเป็น binary hybrid state machine ที่มี index, hysteresis และ dwell timer แยกต่อ IBR แต่ chronology ชุดนี้มี override ที่ประกาศเพิ่มสองจุด ได้แก่ SG-trip all-GFM และ coordinated SG-reference handback |
| ใช้เกณฑ์อะไร | local index route ใช้ AGSI$^{++} \geq \Gamma_{on}$ ต่อเนื่องครบ $T_{d,on}$ สำหรับ GFL$\longrightarrow$GFM และใช้ AGSI$^{++} < \Gamma_{off}$ พร้อม $GRA = 1$ ครบ $T_{d,off}$ สำหรับ GFM$\longrightarrow$GFL ส่วนชั้นประสานงานตรวจสถานะ SG/breaker และความพร้อมของ reference เพิ่มเติม เพื่อให้ระบบไม่เข้าสู่ภาวะไม่มีผู้กำหนดมุมและความถี่ |
| สลับพร้อมกันหรือไม่ | ตามกลไก local ไม่จำเป็นต้องพร้อมกัน เพราะแต่ละ IBR มี index/timer ของตนเอง แต่ผลชุดนี้สลับพร้อมกันที่ 20 s เพราะ local AGSI supervisor ทำงานร่วมกับเงื่อนไข “SG unavailable” แล้ว event transaction commit all-GFM แบบ atomic และกลับพร้อมกันที่ 146.825 s เพราะ coordinated handback หลัง SG ผ่าน synchronism guard |
| ตัวใดเป็น slack bus | ตอน SG online บัส 1 เป็น REF ของ power flow ระหว่าง SG offline ไม่มี IBR ตัวใดถูกเปลี่ยนเป็น algebraic PF slack; IBR1 ทำหน้าที่ reference leader ด้านมุม/ความถี่ของ island เท่านั้น ขณะเดียวกันทุกบัสยังคงอยู่ในสมการ KCL |
| รู้ได้อย่างไรว่ากลับสภาวะปกติ | ต้องดูพร้อมกันทั้ง breaker state, mode, KCL residual, แรงดัน, ความถี่, กำลังกล/ไฟฟ้า และแนวโน้ม settling ชุดนี้กลับ all-GFL แรงดันอยู่ในช่วงปกติ และ $f_{SG} = 60.0002$ Hz ที่ 200 s กลับเข้าสู่ steady จาก transient จึงรายงานว่า recovery สำเร็จ ไม่ใช่แค่ settling อยู่ |

# 2 ขอบเขต case และ operating point

ฐานระบบคือ $S_{base} = 100$ MVA และ $f_0 = 60$ Hz ตำแหน่งทรัพยากรเป็น SG บัส 1 และ IBR1–IBR4 บัส 2, 3, 6, 8 การนำข้อมูลจากไฟล์ตัวอย่างมาใช้ถูกจัดเป็น `SOURCE_DEFINED` หรือ `CASE_DEFINED` ตามชนิดข้อมูล ส่วนการแจกจ่ายกำลังหลัง SG trip และตัวควบคุม synchronism/governor ที่เอกสารไม่ได้ให้ครบถูกแยกเป็น `PROJECT_DERIVED` หรือ `ASSUMED_DIAGNOSTIC` อย่างชัดเจน




รูปที่ 1: โครงข่ายที่ใช้จริง: SG บัส 1 และ IBR1–IBR4 ที่บัส 2, 3, 6 และ 8

## 2.1 ผล power flow ของบัสและสายส่ง

บัส REF กำหนด $|V|, \theta$; บัส PV กำหนด $P, |V|$; บัส PQ กำหนด $P, Q$ ปริมาณที่เหลือเป็น ผลลัพธ์ของ Newton–Raphson ภายในโครงการ ตารางใช้เครื่องหมายลบเฉพาะค่าติดลบตามที่ขอ

ตารางที่ 1: ผล bus power flow (pu)

| Bus | Type | $\|V\|$ | $\theta$ (deg) | $P_g$ | $Q_g$ | $P_L$ | $Q_L$ | $Q_{min}$ | $Q_{max}$ | $P_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | REF | 1.00000 | 0.0000 | 1.33190 | -0.19567 | 0.00000 | 0.00000 | 0 | 0.1 | 3.324 |
| 2 | PQ | 0.99145 | -3.2585 | 0.31718 | 0.17674 | 0.21700 | 0.12700 | -0.4 | 0.5 | 1.4 |
| 3 | PQ | 0.96673 | -8.6921 | 0.28844 | 0.16073 | 0.94200 | 0.19000 | 0 | 0.4 | 1 |
| 4 | PQ | 0.98316 | -6.7064 | 0.00000 | 0.00000 | 0.47800 | -0.03900 | – | – | – |
| 5 | PQ | 0.98583 | -5.5221 | 0.00000 | 0.00000 | 0.07600 | 0.01600 | – | – | – |
| 6 | PQ | 1.05753 | -6.7136 | 0.44428 | 0.24757 | 0.11200 | 0.07500 | -0.06 | 0.24 | 1 |
| 7 | PQ | 1.02532 | -6.9205 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | – | – | – |
| 8 | PQ | 1.04937 | -4.4090 | 0.26765 | 0.14915 | 0.00000 | 0.00000 | -0.06 | 0.24 | 1 |
| 9 | PQ | 1.02193 | -8.6416 | 0.00000 | 0.00000 | 0.29500 | 0.16600 | – | – | – |
| 10 | PQ | 1.02024 | -8.5886 | 0.00000 | 0.00000 | 0.09000 | 0.05800 | – | – | – |
| 11 | PQ | 1.03470 | -7.7782 | 0.00000 | 0.00000 | 0.03500 | 0.01800 | – | – | – |
| 12 | PQ | 1.04112 | -7.6862 | 0.00000 | 0.00000 | 0.06100 | 0.01600 | – | – | – |
| 13 | PQ | 1.03421 | -7.8345 | 0.00000 | 0.00000 | 0.13500 | 0.05800 | – | – | – |
| 14 | PQ | 1.00870 | -9.3374 | 0.00000 | 0.00000 | 0.14900 | 0.05000 | – | – | – |

ตารางที่ 2: กำลังด้าน from และ loss ของสายส่ง (pu)

| Line | From | To | $P_{from}$ | $Q_{from}$ | $P_{loss}$ | $Q_{loss}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 0.910918 | -0.153112 | 0.016392 | -0.002303 |
| 2 | 1 | 5 | 0.420987 | -0.042553 | 0.009593 | -0.008907 |
| 3 | 2 | 3 | 0.466697 | 0.013221 | 0.010470 | 0.002115 |
| 4 | 2 | 4 | 0.316733 | -0.064476 | 0.006065 | -0.014738 |
| 5 | 2 | 5 | 0.211276 | -0.049810 | 0.002649 | -0.025732 |
| 6 | 3 | 4 | -0.197333 | -0.018164 | 0.002803 | -0.005014 |
| 7 | 4 | 5 | -0.448842 | 0.084724 | 0.002882 | 0.009089 |
| 8 | 4 | 7 | 0.018419 | -0.096315 | 0.000000 | 0.001990 |
| 9 | 4 | 9 | 0.062955 | -0.012297 | 0.000000 | 0.002223 |
| 10 | 5 | 6 | 0.092297 | 0.001911 | 0.000000 | 0.001920 |
| 11 | 6 | 11 | 0.130821 | 0.059907 | 0.001758 | 0.003682 |
| 12 | 6 | 12 | 0.086088 | 0.027130 | 0.000895 | 0.001864 |
| 13 | 6 | 13 | 0.207667 | 0.085524 | 0.002983 | 0.005875 |
| 14 | 7 | 8 | -0.267650 | -0.134127 | 0.000000 | 0.015018 |
| 15 | 7 | 9 | 0.286069 | 0.035823 | 0.000000 | 0.008698 |
| 16 | 9 | 10 | -0.003258 | 0.021664 | 0.000015 | 0.000039 |
| 17 | 9 | 14 | 0.057282 | 0.023368 | 0.000466 | 0.000991 |
| 18 | 10 | 11 | -0.093273 | -0.036375 | 0.000790 | 0.001849 |
| 19 | 12 | 13 | 0.024192 | 0.009266 | 0.000137 | 0.000124 |
| 20 | 13 | 14 | 0.093739 | 0.030791 | 0.001556 | 0.003168 |

ตาราง bus power flow เพิ่มคอลัมน์ $Q_{min}$, $Q_{max}$ และ $P_{max}$ ค่าเหล่านี้เป็น *SOURCE_DEFINED* จากข้อมูลเครื่องกำเนิดของ IEEE14 (`mpc.gen` คอลัมน์ 5, 4 และ 9 ในหน่วย MVAr และ MW) แปลงเป็นเปอร์ยูนิตด้วยฐานระบบเดียว $S_{base} = 100$ MVA:

$$Q_{\text{max,pu}} = \frac{Q_{\text{max,MVAr}}}{100}, \qquad Q_{\text{min,pu}} = \frac{Q_{\text{min,MVAr}}}{100}, \qquad P_{\text{max,pu}} = \frac{P_{\text{max,MW}}}{100}. \tag{1}$$

บัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไม่มีขีดจำกัด (แสดงด้วย –) การบังคับ Q-limit เปิดใช้งานแล้ว แต่บนจุด ทำงานนี้ SG เป็น slack และ IBR ทุกตัวเป็น PQ resource จึงไม่มีบัส PV ให้สลับ PV⟶PQ (rounds $= 0$)

รายงานตรงสองข้อโดยไม่ปิดบัง: บัส 1 (slack) ได้ $Q_g = -0.196$ pu เทียบขีดจำกัด $Q_{\text{min}} = 0$ และบัส 6 ได้ $Q_g = 0.2476$ pu เทียบ $Q_{\text{max}} = 0.24$ ทั้งสองไม่ใช่ความผิดพลาดเชิงตัวเลข เพราะ บัส REF ดูดซับกำลังรีแอกทีฟที่ทำให้สมดุลโครงข่ายปิด และ PQ resource จ่าย $Q$ ตามที่กำหนดไว้ ส่วนกลไก PV⟶PQ นิยามไว้สำหรับบัส PV เท่านั้นจึงไม่มีผลกับทั้งสองบัส คอลัมน์นี้จึงรายงาน ขีดจำกัดตามแหล่งข้อมูล ไม่ใช่ข้ออ้างว่าจุดทำงานนี้อยู่ในขีดจำกัดครบทุกบัส

## 3 AGSI++: สมการและความหมายของตัวแปรทุกตัว

$$J_V = \frac{|V - V_{ref}|}{0.10}, \qquad J_f = \frac{|f - 60|}{0.50}, \qquad J_R = \frac{|\mathrm{d}f/\mathrm{d}t|}{1.0}, \tag{2}$$

$$J_P = \frac{|P_{ref} - P|}{0.20}, \qquad J_{SCR} = \max\left(0, \frac{3}{SCR} - 1\right), \qquad J_{lock} = \frac{|v_q|}{0.10}, \tag{3}$$

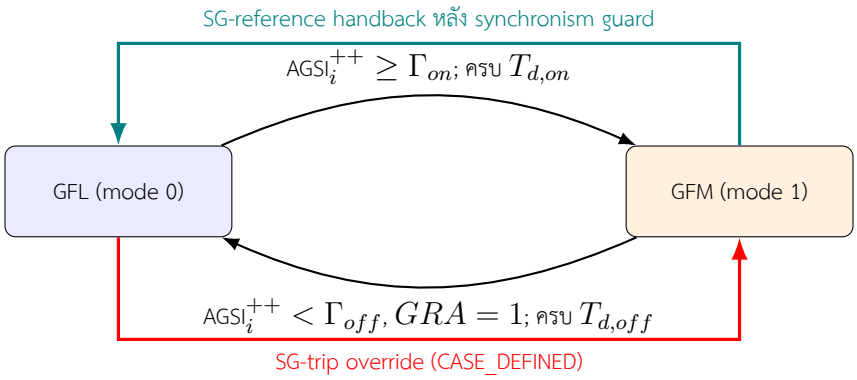
$$J_{GRA} = 1 - GRA. \tag{4}$$

$$\text{AGSI}_i^{++} = \min\left(1, \max\left(0, \frac{J_V + J_f + J_R + J_P + J_{SCR} + J_{lock} + J_{GRA}}{7}\right)\right). \tag{5}$$

| ตัวแปร | ความหมายและหน่วย |
|---|---|
| $V, V_{ref}$ | ขนาดแรงดันที่ PCC และค่าอ้างอิง หน่วย pu; $J_V$ วัด voltage deviation |
| $f$ | ความถี่ หน่วย Hz; ใน GFM อ่านจาก virtual rotor ส่วน GFL ชุด production นี้ใช้ความถี่ ของเฟสแรงดัน PCC เนื่องจาก active GFL subset ไม่มี PLL-frequency state แยก |
| $\mathrm{d}f/\mathrm{d}t$ | RoCoF หน่วย Hz/s คำนวณจาก accepted samples แล้วผ่าน low-pass ตามสัญญา AGSI++; จุดเวลา event ซ้ำซ้าย/ขวาไม่นำมาหารด้วย $\Delta t = 0$ |
| $P, P_{ref}$ | กำลังจริงที่อุปกรณ์ฉีดและ setpoint บนฐานระบบ หน่วย pu; $J_P$ คือ tracking stress |
| $SCR$ | short-circuit ratio; เมื่อ $SCR \geq 3$ จะได้ $J_{SCR} = 0$ และเมื่ออ่อนกว่านั้น stress เพิ่ม |
| $v_q$ | แรงดันแกน q ในกรอบอ้างอิงของอุปกรณ์ หน่วย pu ใช้บอก phase/lock mismatch |
| $GRA$ | grid-reference availability; เท่ากับ 1 เมื่อมี SG online หรือมี committed GFM reference |
| $J_{GRA}$ | missing-reference stress เท่ากับ 0 เมื่อมี reference และ 1 เมื่อไม่มี |
| $i$ | หมายเลข IBR แต่ละตัวคำนวณ index และ timer ของตัวเอง |
| $\Gamma_{on}, \Gamma_{off}$ | threshold แบบ hysteresis เท่ากับ 0.65 และ 0.35 |
| $T_{d,on}, T_{d,off}$ | dwell time 0.10 s และ 1.00 s |

ผลรวมดิบสามารถเกินหนึ่งได้ แต่ค่าที่เผยแพร่และเปรียบเทียบ threshold ถูก saturate ให้อยู่ใน $[0, 1]$ เสมอ การแตะเส้นเพียง sample เดียวไม่ทำให้ commit; ต้องอยู่ในเงื่อนไขต่อเนื่องครบ dwell ถ้าหลุดก่อน timer จะ reset

# 4 State machine และความแตกต่างระหว่าง index กับ override




รูปที่ 2: binary state machine พร้อม threshold, dwell และ override ที่แยกออกจาก index-driven switching

ผล chronology นี้ใช้ลูกศร override สองเส้น: ที่ 20 s SG-trip transaction เปิด SG และ commit IBR ทั้งสี่เป็น GFM แบบ atomic; ที่ 146.825 s เมื่อ SG ผ่าน guard แล้ว transaction จึงคืน reference ให้ SG และ transfer IBR ทั้งสี่กลับ GFL ตามด้วย right-limit KCL solve ดังนั้น mode timeline ที่พร้อมกัน เป็นผลของ coordinated transaction ไม่ใช่หลักฐานว่า index ทั้งสี่ตัด threshold พร้อมกัน

# 5 สมการ state ของ SG และ IBR

## 5.1 SG แบบ operational EMF6 หก state

กำหนด

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

โดย $\delta$ คือมุมโรเตอร์, $\Delta\omega$ คือ speed deviation, $E'_q, E'_d$ คือ transient EMF และ $E''_q, E''_d$ คือ subtransient EMF สมการหลักคือ

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega, \tag{6}$$

$$2H\dot{\Delta\omega} = P_m - P_e - D\Delta\omega, \tag{7}$$

$$T'_{d0}\dot{E}'_q = E_{fd} + c_d E''_q - d_d E'_q, \tag{8}$$

$$T'_{q0}\dot{E}'_d = c_q E''_d - d_q E'_d, \tag{9}$$

$$T''_{d0}\dot{E}''_q = E'_q - E''_q - (X'_d - X''_d) I_d, \tag{10}$$

$$T''_{q0}\dot{E}''_d = E'_d - E''_d + (X'_q - X''_q) I_q. \tag{11}$$

$H$ คือ inertia constant, $D$ คือ damping, $P_m$ คือ mechanical input, $P_e$ คือ electrical air-gap power, $E_{fd}$ คือ field input และ $I_d, I_q$ คือกระแส stator ในกรอบโรเตอร์ case นี้มี $T'_{q0} = 0$ จึงใช้ singular limit แบบ exact โดย freeze $E'_d = 0$ ไม่แทนด้วย epsilon

## 5.2 governor/turbine เพิ่มเติมโดยไม่เปลี่ยนลำดับ EMF6

state ของ prime mover สองตัวคือ valve position $P_{SV}$ และ mechanical power $P_m$:

$$T_{SV}\dot{P}_{SV} = -P_{SV} + P_c - \frac{\Delta\omega}{R}, \tag{12}$$

$$T_{CH}\dot{P}_m = -P_m + P_{SV}. \tag{13}$$

สมการเป็นโครงสร้าง non-reheat turbine/governor ตาม Sauer–Pai ใช้ $R = 0.05, T_{SV} = 0.2$ s และ $T_{CH} = 0.4$ s ตาม manifest ที่ freeze ก่อนรัน การเพิ่มสอง state นี้ไม่ได้ เปลี่ยนคำว่า “SG หก state” เพราะหก state หมายถึง electromagnetic machine ส่วน

governor เป็น subsystem ภายนอก หลัง breaker close จะ initialize $P_{SV}, P_m$ แบบ bumpless ที่ input equilibrium และทำ primary speed regulation ต่อเนื่อง ไม่มี secondary integral/AGC และไม่มี BO

ระหว่าง SG offline มี deterministic phase planner และ voltage matcher เพื่อให้ค่าก่อนปิดเข้า guard กลไกนี้เป็น `ASSUMED_DIAGNOSTIC` ไม่ใช่ controller ที่ยืนยันจากเครื่องจริง จึงใช้ผลนี้ ยืนยัน workflow ได้ แต่ยังใช้รับรอง protection/control deployment ไม่ได้

### 5.3 IBR dual-mode full-state

branch GFM ใช้ REGFM_B1 VSG (NREL/TP-5D00-90260) และ branch GFL ใช้ WECC REGC_A/REEC_A positive-sequence model โดย implementation และตัวแก้สมการเป็นโค้ด MATLAB ภายในโครงการ กำหนด full-state switching superset ของ IBR แต่ละตัวเป็น

$$x_{IBR} = \begin{bmatrix} x_{GFM}^T & x_{GFL}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{20}, \tag{14}$$

โดย state vector ของสอง branch เรียงตรงกับ production code ดังนี้

$$\begin{aligned} x_{GFM} = [&\Delta\omega_m, \delta_{IT}, x_w, x_E, \delta_{PLL}, x_{PLL}, P_{inv,f}, I_{d,inv,f}, Q_{inv,f}, \\ &V_{inv,f}, I_{q,inv,f}, \delta_{IT,max}, \delta_{IT,min}]^T, \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} x_{GFL} = [&V_{t,f}, P_f, I_{q,cmd,f}, P_{ord}, \\ &V_{LVPL,f}, I_{p,reg}, I_{q,reg}]^T. \end{aligned} \tag{16}$$

สำหรับ GFM, $\Delta\omega_m$ คือ speed deviation ของ virtual synchronous machine, $\delta_{IT}$ คือมุม VSM เทียบ PLL, $x_w$ คือ washout state, $x_E$ คือ voltage-PI integrator, $\delta_{PLL}, x_{PLL}$ คือมุมและ integrator ของ PLL, ตัวแปรลงท้าย $f$ คือค่าผ่าน measurement filter และ $\delta_{IT,max/min}$ คือขอบเขตมุมจาก active-current limiter สมการ state หลักที่ใช้จริงคือ

$$2H\dot{\Delta\omega}_m = P_{ref,inv} - P_{inv,f} - (1/m_p + D_1)\Delta\omega_m - D_2(\Delta\omega_m - x_w), \tag{17}$$

$$\dot{x}_w = \omega_D(\Delta\omega_m - x_w), \tag{18}$$

$$\dot{\delta}_{PLL} = \omega_0(k_{p,PLL}v_q + k_{i,PLL}x_{PLL}), \tag{19}$$

$$\dot{x}_{PLL} = v_q, \tag{20}$$

$$\dot{\delta}_{IT} = \omega_0\Delta\omega_m - \dot{\delta}_{PLL}, \tag{21}$$

$$\dot{x}_E = V_{ref} - V_{inv,f}, \tag{22}$$

$$T_{pf}\dot{P}_{inv,f} = \kappa P - P_{inv,f}, \tag{23}$$

$$T_{If}\dot{I}_{d,inv,f} = \kappa I_d - I_{d,inv,f}, \tag{24}$$

$$T_{Qf}\dot{Q}_{inv,f} = \kappa Q - Q_{inv,f}, \tag{25}$$

$$T_{Vf}\dot{V}_{inv,f} = |V| - V_{inv,f}, \tag{26}$$

$$T_{If}\dot{I}_{q,inv,f} = \kappa I_q - I_{q,inv,f}, \tag{27}$$

$$\dot{\delta}_{IT,max} = k_I(I_{d,max}^{SS} - I_{d,inv,f}), \tag{28}$$

$$\dot{\delta}_{IT,min} = k_I(-K_e I_{d,max}^{SS} - I_{d,inv,f}). \tag{29}$$

เมื่อชนขอบเขตแล้วอนุพันธ์ที่พยายามดัน state ออกนอกขอบเขตจะถูก hold ตาม conditional anti-windup ในโค้ด ส่วนแหล่งแรงดันหลัง impedance ใช้

$$I_{sys} = \frac{E_{VSM}e^{j(\delta_{PLL}+\delta_{IT})} - V}{\kappa(R_e + jX_L)}, \qquad |I_{sys}| \le \frac{I_{max}^F}{\kappa}, \tag{30}$$

โดย $E_{VSM}$ มาจาก Q–V droop และ voltage PI ก่อนผ่านขอบเขต $E_{min/max}$; PLL จะ freeze ตาม $V_{PLL,frz}$ ที่ประกาศ จึงเป็น GFM ที่สร้างมุม/ความถี่ ไม่ใช่การกำหนด algebraic PF slack bus ขึ้นมาใหม่

สำหรับ GFL, $V_{t,f}$, $P_f$ คือแรงดันและกำลังจริงที่กรองแล้ว, $I_{q,cmd,f}$ คือคำสั่ง reactive current หลัง lag, $P_{ord}$ คือ active-power order, $V_{LVPL,f}$ คือแรงดันกรองของ low-voltage power logic และ $I_{p,reg}$, $I_{q,reg}$ คือกระแสที่ REGC_A ส่งเข้าสู่ network:

$$T_{rv}\dot{V}_{t,f} = |V| - V_{t,f}, \qquad T_p\dot{P}_f = \kappa P - P_f, \tag{31}$$

$$\dot{P}_{ord} = \text{rate}_{[dP_{min},dP_{max}]}\left(\frac{\text{sat}(P_{ref,inv}) - P_{ord}}{T_{pord}}\right), \tag{32}$$

$$T_{iq}\dot{I}_{q,cmd,f} = I_{q,cmd} - I_{q,cmd,f}, \qquad T_{fltr}\dot{V}_{LVPL,f} = |V| - V_{LVPL,f}, \tag{33}$$

$$T_g\dot{I}_{p,reg} = I_{p,target} - I_{p,reg}, \qquad T_g\dot{I}_{q,reg} = I_{q,cmd,f} - I_{q,reg}. \tag{34}$$

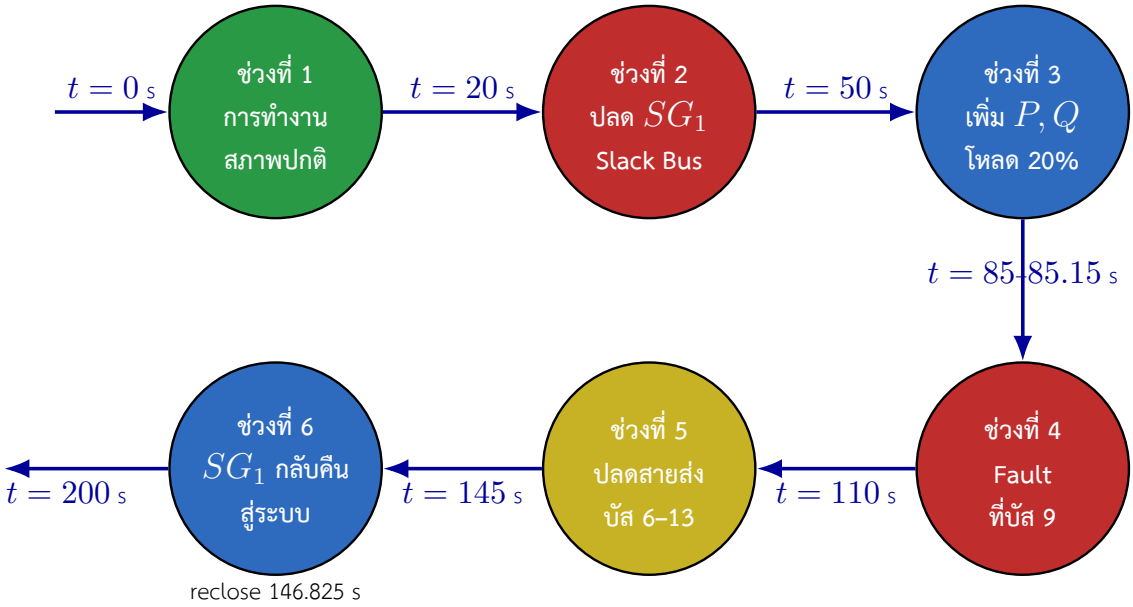
$I_{p,target}$ รวม LVPL/low-voltage active-current management; $I_{q,cmd}$ รวม voltage-dip reactive-current path และ P-priority current limit ตาม REGC_A/REEC_A ตัวแปร $\kappa = S_{base}/M_{base}$ ใช้แปลง system base ไป inverter base เพียงครั้งเดียวที่ boundary

เลข mode 0/1 จึงเป็นตัวเลือก active branch ไม่ใช่แบบจำลองทั้งหมด: branch ที่ active เท่านั้นเข้าสู่ dynamic solve แต่ state ทั้ง 20 ตัวคงอยู่เพื่อทำ state mapping ตอน transfer ทั้งสอง branch ใช้ registered current injection ที่ผูกกับ full network KCL หลังสลับโหมดต้องแก้ algebraic right limit ใหม่ และหาก KCL ไม่ผ่าน transaction จะ rollback/fail-closed

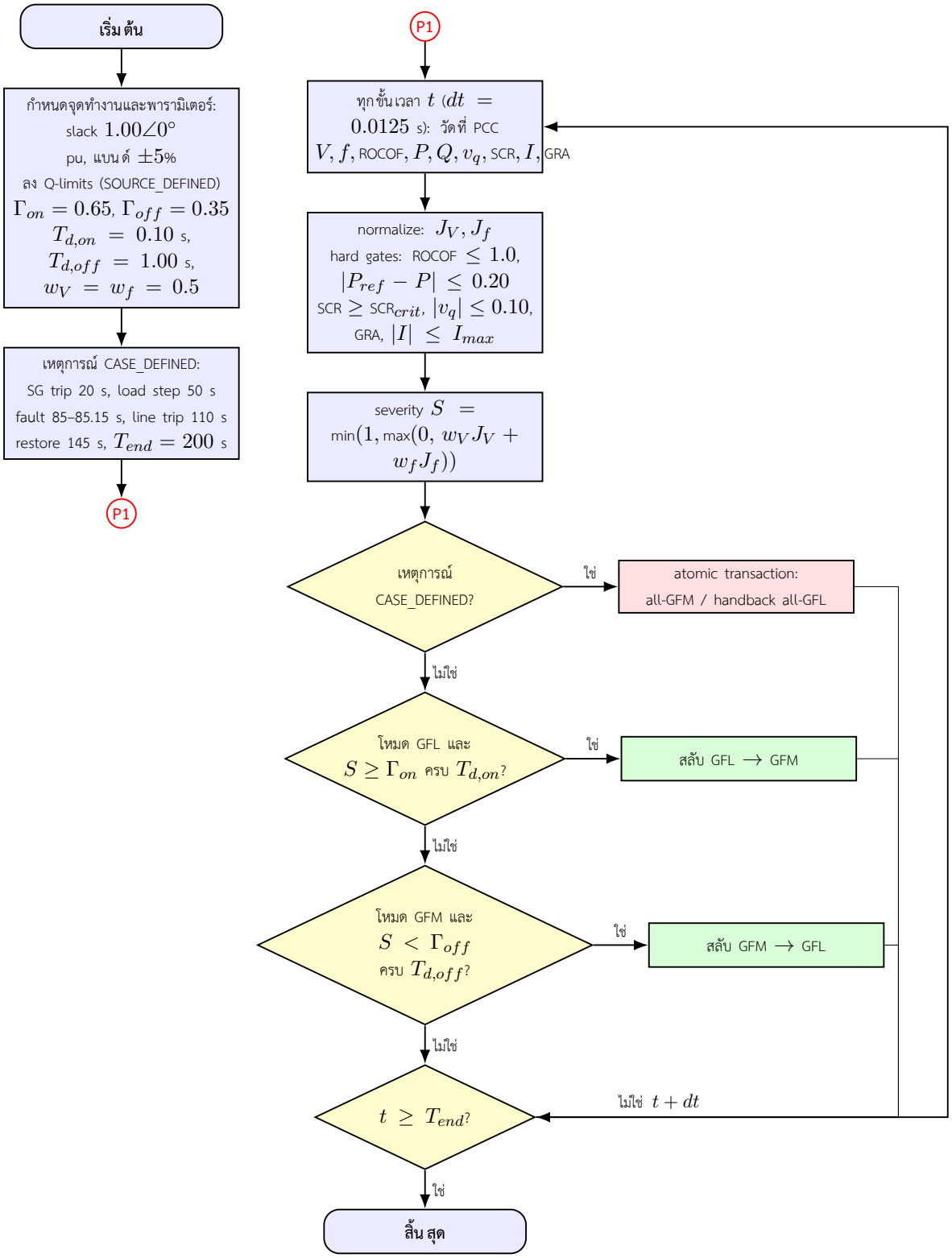
## 6 ลำดับเหตุการณ์ 200 วินาทีและหลักฐาน transaction

ตารางที่ 3: เวลา เหตุการณ์ AGSI++ timer โหมดก่อน–หลัง และเหตุผลจาก accepted event log

| Time (s) | Event / index | Timer | Mode before ⟶ after | Reason |
|---|---|---|---|---|
| 20.000 | SG trip / 0.114 | reference-loss guard | all GFL ⟶ all GFM | SG opened; atomic all-GFM reference-security commit |
| 50.000 | load step / 0.393 | – | all GFM ⟶ all GFM | base constant-impedance load increased |
| 85.000 | fault on / 0.550 | – | all GFM ⟶ all GFM | bus-9 shunt fault applied |
| 85.150 | fault clear / 1.000 | – | all GFM ⟶ all GFM | fault admittance removed |
| 110.000 | line trip / 0.550 | – | all GFM ⟶ all GFM | line 6–13 opened |
| 145.000 | topology restore / 0.539 | – | all GFM ⟶ all GFM | base load and line restored |
| 145.000 | SG close request / 0.539 | – | all GFM ⟶ all GFM | earliest close request; guard monitored |
| 146.825 | SG reclose / 0.393 | 0.5-s sync dwell | all GFM ⟶ all GFL | guard passed; SG reference handback |




รูปที่ 3: ลำดับเหตุการณ์รบกวนหกช่วงของการจำลอง 200 s จาก accepted production event log: ระบบปกติที่ 0 s, ปลด SG ที่ 20 s, เพิ่มโหลด $P, Q$ 20% ที่ 50 s, fault บัส 9 ช่วง 85–85.15 s, เปิดสาย 6–13 ที่ 110 s และ SG กลับคืนที่ 145 s (reclose 146.825 s)

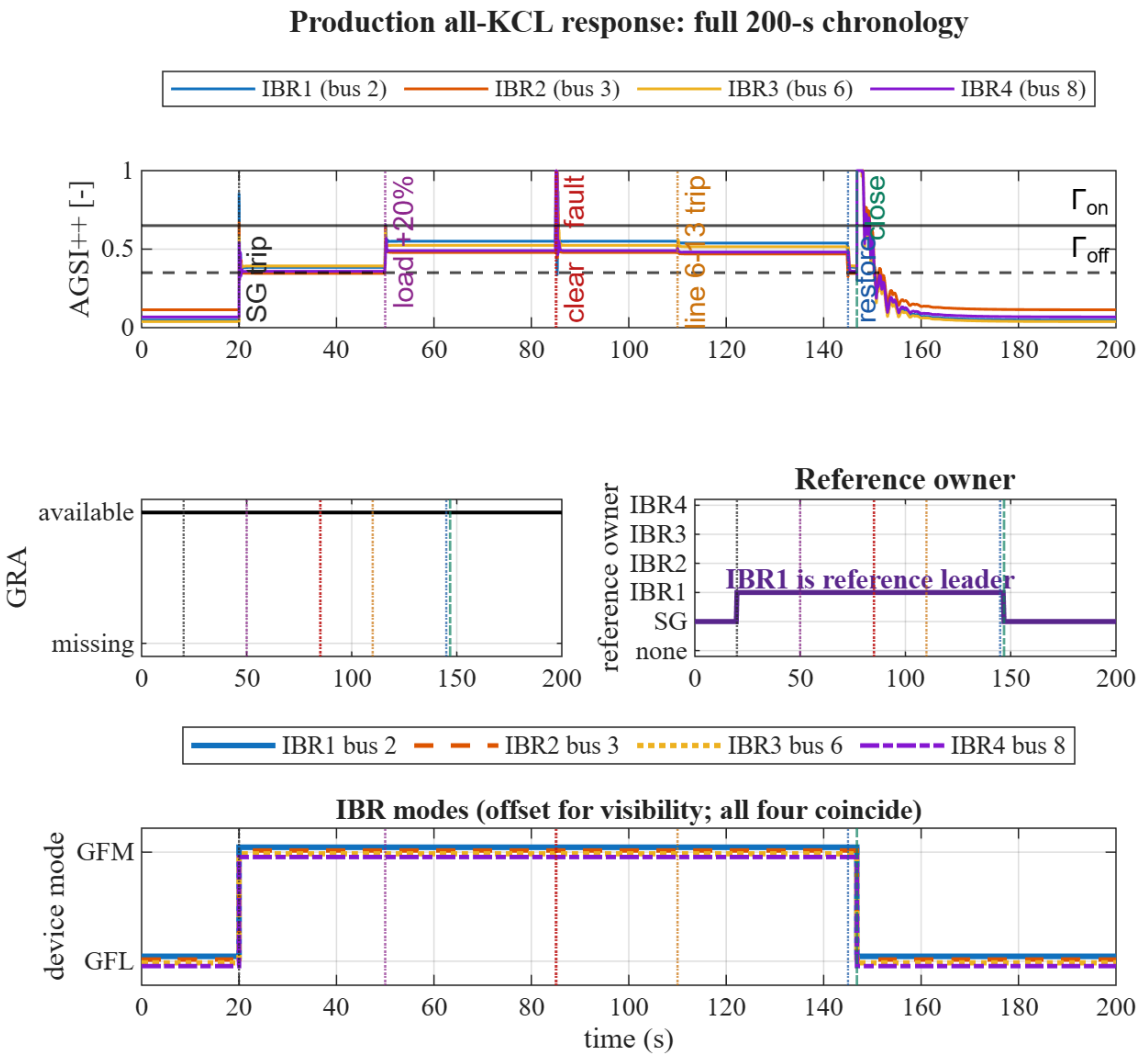



รูปที่ 4: ผังการทำงานกลยุทธ์สลับโหมด GFL/GFM: คอลัมน์ซ้ายกำหนดจุดทำงาน พารามิเตอร์ และ เหตุการณ์ CASE_DEFINED; คอลัมน์ขวาเป็น online loop ที่วัดสัญญาณที่ PCC ทุกขั้นเวลา คำนวณ severity และตัดสินใจสลับโหมดตาม threshold และ dwell หรือผ่าน atomic transaction

ลำดับที่ใช้ตรงตามชุด verify: 0–20 s ระบบปกติ; 20 s ปลด SG; 50 s เพิ่มโหลด active/reactive ทุกจุด 20%; 85–85.15 s fault บัส 9 ด้วย $Z_f = 0.01 + j0.01$ pu; 110 s เปิดสาย 6–13; 145 s คืนสายและโหลดฐานพร้อมส่ง earliest SG-close request; 146.825 s SG ปิดจริงหลัง guard; 200 s สิ้นสุดการจำลอง จุด fault ใช้ admittance homotopy เฉพาะการหา right-limit initial guess แต่ endpoint ใช้ $Z_f$

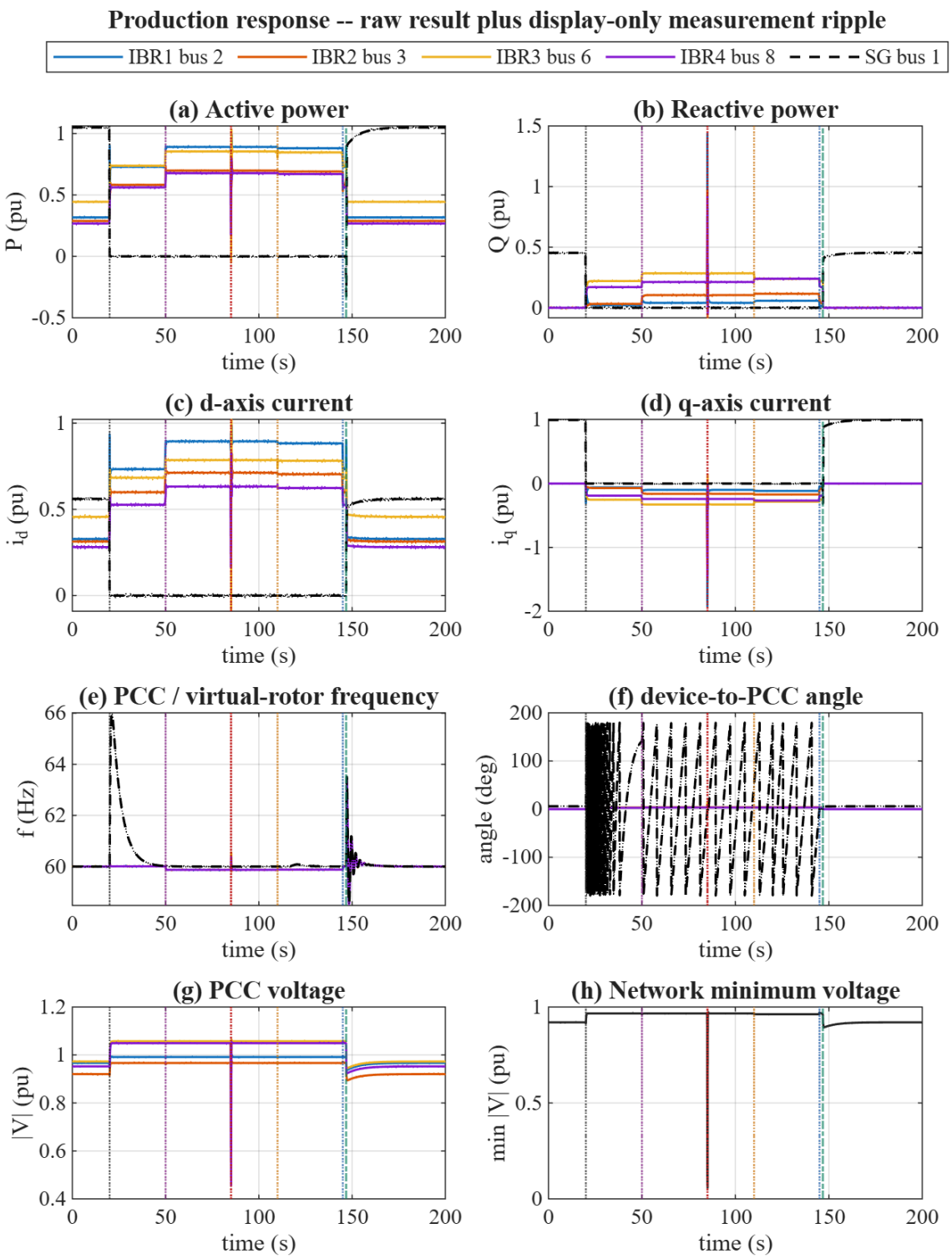
exact และ tolerance เดิม ไม่ได้ทำ fault ให้อ่อนลง

## 7 กราฟ AGSI, mode, SG และ IBR ครบ 200 วินาที

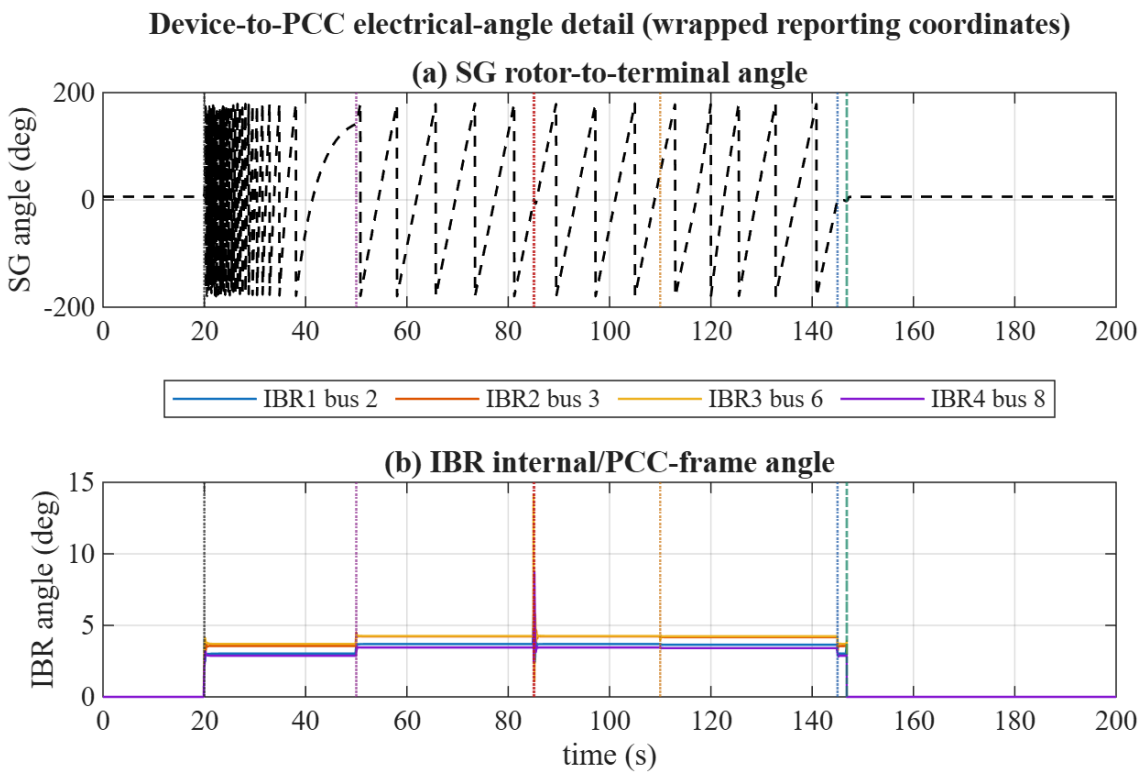



รูปที่ 5: AGSI++ ที่ถูกจำกัดใน $[0, 1]$, GRA, reference owner และ mode timeline ของ IBR1–IBR4 รวมในกราฟเดียว โหมดเป็น GFL ก่อน 20 s, GFM ช่วง 20–146.825 s และกลับ GFL หลัง 146.825 s เส้นทั้งสี่ใช้รูปแบบต่างกัน (ทึบ/ประ/จุด/ประ-จุด) และเลื่อนแนวตั้งเล็กน้อยเพื่อการมองเห็นเท่านั้น ($\pm 0.045$ ของพิกัดโหมด 0/1) เพราะทั้งสี่เส้นทับกันสนิท

สังเกตว่า GRA ยังเป็น 1 ตลอด เพราะก่อน trip มี SG เป็น reference และ transaction ที่ 20 s commit GFM reference แบบ atomic โดยไม่ปล่อยช่วง “ไม่มี reference” ช่อง reference owner ระบุ โดยตรงว่า IBR1 (บัส 2) เป็น grid-forming angle/frequency leader ระหว่าง SG เปิด ส่วน IBR2–IBR4 เป็น GFM ที่แบ่งกำลังและช่วยแรงดัน แต่ไม่ได้เป็น owner ของ reference เดียวใน formulation นี้ AGSI ที่ลดต่ำกว่า $\Gamma_{on}$ หลัง transient ไม่ได้สั่งกลับทันที เพราะการคืน GFM$\longrightarrow$GFL ยังต้องรอ $GRA = 1$, off-dwell และ coordinated handback ให้ SG ที่ผ่าน synchronism guard ก่อน




รูปที่ 6: กราฟ $P, Q, i_d, i_q, f$, มุมเทียบ PCC, แรงดัน PCC และแรงดันต่ำสุดของโครงข่าย เส้นประดำคือ SG เส้นสีทึบคือ raw production result ส่วนเส้นจุดสีเดียวกันคือ ripple แบบ band-limited ที่ seed คงที่เพื่อการนำเสนอเท่านั้น ripple ต่อเนื่องตามเวลาและไม่สร้าง spike ที่ event; เส้นตั้ง/ยอดแหลม ณ เวลา event ที่ยังเห็นอยู่เป็น raw switching transient จริง




รูปที่ 7: รายละเอียดมุม SG และ IBR เทียบ PCC มุม SG ขณะ offline มี slip จึงแสดงแบบ wrap ในช่วง $[-180, 180)$ องศา ไม่ได้ clip state จริง

## 8 ผล recovery ที่ตรวจได้และสิ่งที่ยังกล่าวไม่ได้

SG ผ่าน guard ที่ 146.825 s ด้วย

$$\Delta V = 0.0163 \text{ pu}, \qquad \Delta f = 2.75 \times 10^{-6} \text{ pu}, \qquad \Delta\theta = 3.76^\circ,$$

ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ $0.05$ pu, $0.001$ pu และ $10^\circ$ ตามลำดับ หลัง handback ที่ 200 s:

- SG online และ IBR ทั้งสี่อยู่ GFL;
- ช่วงแรงดันของทุกบัสเป็น 0.9203–1.0000 pu โดยบัส SG/IBR อยู่ในแบนด์ $\pm 5$% แต่บัสโหลด ระยะไกลห้าบัสยังต่ำกว่า $V_{\min} = 0.95$ pu;
- $P_{e,SG} = 1.0497$ pu และ $Q_{SG} = 0.4531$ pu อยู่ในช่วงสมดุล;
- $f_{SG} = 60.0002$ Hz กลับสู่ steady จาก transient excursion;
- accepted-step residual สูงสุด $9.99 \times 10^{-9}$, subdivision สูงสุดหนึ่งชั้น และทุก state finite.

ดังนั้นคำตอบเรื่อง “ต้องกลับสภาวะปกติ” คือ กลับด้าน topology/reference/mode/frequency แล้ว และความถี่กลับสู่ steady ที่ 200 s แต่จุดสิ้นสุดยังไม่พาบัสโหลดระยะไกลทุกบัสกลับเข้าแบนด์ $\pm 5$% ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า reclose และ handback ประสบความสำเร็จแต่ reactive profile ยัง ไม่ครบ recovery ระดับ $\pm 5$% ทั้งหมด และไม่ใช่การยืนยัน controller ระดับใช้งานจริง

## 9 สรุปหลายเหตุการณ์ที่มีหลักฐาน

| เหตุการณ์ | หลักฐานและขอบเขต |
|---|---|
| no-event | mixed equilibrium ผ่าน full KCL, frozen-state และ finite-residual gates; ไม่มี false switch |
| fault เบา | switching-map test เดิมมี ride-through เมื่อ stress ไม่อยู่เหนือ threshold ครบ dwell |
| fault รุนแรง | exact chronology นี้ผ่าน fault บัส 9 และ clear ที่ 85.15 s; $\|V\|_{min}$ ระหว่าง fault ลดถึงประมาณ 0.032 pu แต่ right-limit และ post-clear trajectory ยัง converge |
| load step | load $P/Q$ เพิ่ม 20% ที่ 50 s และระบบเดินต่อถึง fault/line-trip โดยไม่เสีย KCL |
| SG trip | ที่ 20 s SG injection เป็นศูนย์และ all-GFM transaction รับภาระตาม dispatch ที่ประกาศ |
| line trip | เปิดสาย 6–13 ที่ 110 s แล้วคืน topology ที่ 145 s ผ่าน right-limit KCL ทั้งสองครั้ง |
| SG reclose | earliest request ที่ 145 s, close จริง 146.825 s หลัง synchronism dwell แล้ว handback all-GFL |

## 10 ข้อจำกัดของ model และวิธีตอบหากถูกถาม

1. SG electromagnetic plant เป็น EMF6 จริง แต่ synchronizer/phase planner, voltage matcher และ ตัวเลข governor เป็น diagnostic mapping ไม่ใช่ parameter identification ของ SG จริง

2. ไม่มี secondary AGC/integral restoration จึงยังมี frequency offset/settling ที่ endpoint

3. energy source ของ IBR และ reserve-duration ไม่ได้ยืนยันจาก hardware; trajectory แสดงสมการ network/control ที่ประกาศ ไม่ใช่หลักฐานว่า storage จริงมีพลังงานเพียงพอ 125 s

4. กลไกสลับมีสองชั้นที่ทำงานร่วมกัน: local AGSI/hysteresis/dwell ประเมิน stress ราย IBR; ชั้นประสานงานใช้สถานะ SG/reference และ synchronism guard เพื่อ commit reference transfer แบบ atomic ดังนั้นการสลับพร้อมกันใน chronology นี้เกิดจาก coordinated transaction ไม่ใช่การบังคับให้ค่า AGSI ทั้งสี่เท่ากัน

5. ripple ใช้แต่งการนำเสนอเท่านั้น เส้น raw ยังแสดงอยู่ในรูป และ cache/สมการ/AGSI/timer/ผลตัดสิน ไม่มี ripple

6. ผลนี้ไม่มี BO ตามคำสั่งปัจจุบัน วิธี coordinated control ที่ดีกว่าจะคุยกับอาจารย์แยกภายหลัง

## 11 การสร้างซ้ำและสถานะการตรวจสอบ

```
pf_init_paths;
addpath(fullfile('scripts','reporting'));
generate_ieee14_switch_report_figures(reuse_cache=true);
```

ไฟล์ cache หลักมาจาก production run $\Delta t = 0.0125$ s ถึง 200 s บน operating point ใหม่ (slack $|V| = 1.00$ pu, ทำมุม $\phi = 0.508383707164714$) โดยควอร์ด reclose กลับเป็น accepted close ที่ 146.825 s ซึ่งเป็นผลของ synchronism guard ไม่ใช่เวลาที่กำหนดตายตัว จึงไม่มีการอ้าง time-step-independent controller validation หรือเหตุการณ์ที่ปิดเป็นค่าคงที่ targeted tests ครอบคลุม governor primitive, EMF6 singular limit, mixed equilibrium, event transaction, reclose workflow, selector, SG reference, SG-off/GFM TS และข้อห้าม external solver รวม 108/108 tests ผ่าน ส่วน full repository regression ไม่ได้รัน เพราะ targeted gates ครอบคลุม producer/consumer และ failure path ที่เปลี่ยนตามนโยบายความเสี่ยงของโครงการ