การสลับโหมด GFL$\leftrightarrow$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 9.99×10^{-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 ± 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 3

2 ขอบเขต case และ operating point 3

2.1 ผล power flow ของบัสและสายส่ง . . . 4

3 AGSI++: สมการและความหมายของตัวแปรทุกตัว 5

3.1 ที่มาของน้ำหนักและส่วนที่ป้องกันไม่ได้ . . . 7

3.2 การออกแบบดัชนีใหม่: severity บวก hard gate . . . 7

4 State machine และความแตกต่างระหว่าง index กับ override 8

5 สมการ state ของ SG และ IBR 8

5.1 SG แบบ operational EMF6 หก state . . . 8

5.2 governor/turbine เพิ่มเติมโดยไม่เปลี่ยนลำดับ EMF6 . . . 9

5.3 IBR dual-mode full-state . . . 9

5.4 การเลือก branch ตามโหมด . . . 12

6 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการสลับโหมด: อะไรถูกแก้ ณ ขณะเปลี่ยนโหมด 12

6.1 ระบบที่แก้อยู่เป็น DAE ไม่ใช่ ODE . . . 12

6.2 การเปลี่ยนผ่าน ณ ขณะสลับโหมด . . . 13

6.3 แผนที่รีเซ็ตคือความต่อเนื่องที่ขั้ว ไม่ใช่การคัดลอกสถานะ . . . 13

6.4 การปลด SG และการปิดกลับที่มีเงื่อนไขประตู . . . 14

7 ลำดับเหตุการณ์ 200 วินาทีและหลักฐาน transaction 14

8 กราฟ AGSI, mode, SG และ IBR ครบ 200 วินาที 16

9 ผล recovery ที่ตรวจได้และสิ่งที่ยังกล่าวไม่ได้ 18

10 สรุปหลายเหตุการณ์ที่มีหลักฐาน 19

11 ข้อจำกัดของ model และวิธีตอบหากถูกถาม 19

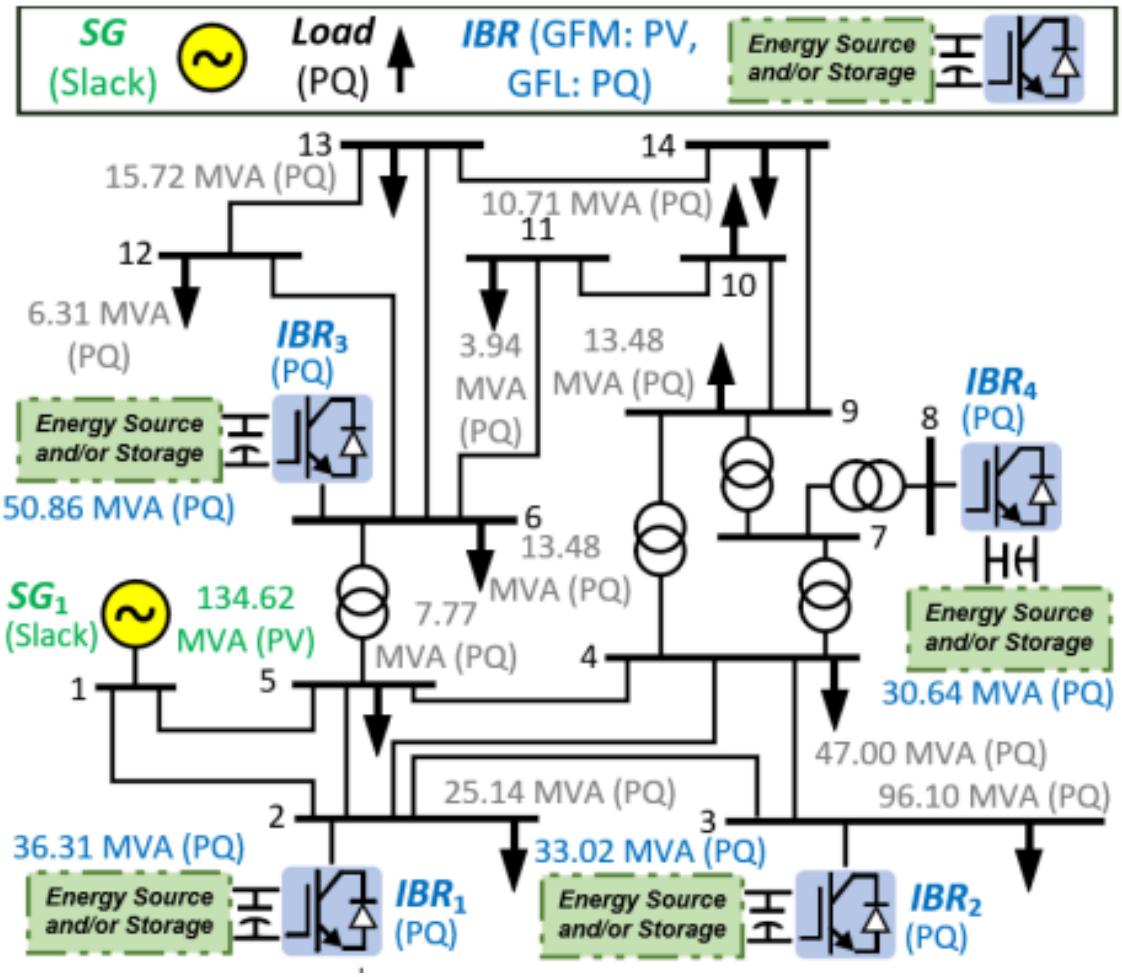
12 การสร้างซ้ำและสถานะการตรวจสอบ 19

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

ตาราง bus power flow มีคอลัมน์ 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 –)

ต้องระบุให้ชัดว่า *การเปิดกลไกไม่เท่ากับการบังคับจุดทำงานนี้* กลไก PV⟶PQ นิยามไว้ สำหรับบัส PV เท่านั้น และเมื่อบัส IBR ถูกกำหนดเป็น PQ resource แล้ว เคสนี้ไม่มีบัส PV เหลือเลย การสลับจึงจบใน 0 รอบและไม่เปลี่ยนอะไร ผลที่ตามมาสองข้อรายงานตรงโดยไม่ปิดบัง: 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 เพราะบัส REF ดูดซับกำลังรีแอกทีฟที่ทำให้ สมดุลโครงข่ายปิด และ PQ resource จ่าย Q ตามที่กำหนดไว้ แต่ทั้งสองก็ไม่ใช่ขีดจำกัดที่การแก้ สมการบังคับจริง คอลัมน์นี้จึงรายงานขีดจำกัดตามแหล่งข้อมูล ไม่ใช่ข้ออ้างว่าจุดทำงานนี้อยู่ใน ขีดจำกัดครบทุกบัส ส่วนเส้นทางบังคับจริงถูกใช้งานโดยเคส IEEE14 พื้นฐานซึ่งมีบัส PV

แบนด์แรงดันที่ยอมรับได้คือ $\pm 5\%$ รอบค่าอ้างอิง slack 1.00 pu กล่าวคือ $V_{\text{max}} = 1.05$ pu และ $V_{\text{min}} = 0.95$ pu ทุกบัส (`CASE_DEFINED` ใน `case_ieee14bus_eecon49_switch`) ต้องเข้าใจให้ตรงว่านี่เป็นแบนด์สำหรับการรายงาน และ การตรวจความยอมรับได้ *ไม่ใช่อินพุตของสมการ power flow* เพราะจุดทำงานนี้มีบัสที่ควบคุม แรงดันเพียงบัส slack บัสเดียว แบนด์จึงไม่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวหนีบ setpoint ของบัส PV มีข้อสังเกตหนึ่งที่รายงานตรงโดยไม่ปิดบัง: บัส 6 แก้ได้ที่ 1.0575 pu สูงกว่า V_{max} อยู่

7.5×10^{-3} pu เพราะทั้ง reactive dispatch ของ IBR6 ที่แมปไว้และอัตราส่วนแท็ปของสาย 5–6 เป็นค่าจากแหล่งข้อมูล/เคส และ *ไม่ได้ถูกปรับเพื่อให้เข้าแบนด์*

คอลัมน์ Type แสดง `bus_role` (REF/PQ/GFL) ซึ่งเป็นป้ายกำกับเท่านั้น ไม่กระทบสมการ หรือค่าที่แก้ได้

ตารางที่ 1: ผล bus power flow (pu)

Bus	Type	$\|V\|$	θ (deg)	P_g	Q_g	P_L	Q_L	Q_{min}	Q_{max}	P_{max}
1	REF	1.0000	0.0000	1.3319	-0.1957	0.0000	0.0000	0.00	0.10	3.32
2	GFL	0.9914	-3.2585	0.3172	0.1767	0.2170	0.1270	-0.40	0.50	1.40
3	GFL	0.9667	-8.6921	0.2884	0.1607	0.9420	0.1900	0.00	0.40	1.00
4	PQ	0.9832	-6.7064	0.0000	0.0000	0.4780	-0.0390	–	–	–
5	PQ	0.9858	-5.5221	0.0000	0.0000	0.0760	0.0160	–	–	–
6	GFL	1.0575	-6.7136	0.4443	0.2476	0.1120	0.0750	-0.06	0.24	1.00
7	PQ	1.0253	-6.9205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	–	–	–
8	GFL	1.0494	-4.4090	0.2677	0.1491	0.0000	0.0000	-0.06	0.24	1.00
9	PQ	1.0219	-8.6416	0.0000	0.0000	0.2950	0.1660	–	–	–
10	PQ	1.0202	-8.5886	0.0000	0.0000	0.0900	0.0580	–	–	–
11	PQ	1.0347	-7.7782	0.0000	0.0000	0.0350	0.0180	–	–	–
12	PQ	1.0411	-7.6862	0.0000	0.0000	0.0610	0.0160	–	–	–
13	PQ	1.0342	-7.8345	0.0000	0.0000	0.1350	0.0580	–	–	–
14	PQ	1.0087	-9.3374	0.0000	0.0000	0.1490	0.0500	–	–	–

3 AGSI++: สมการและความหมายของตัวแปรทุกตัว

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

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

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

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

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

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

3.1 ที่มาของน้ำหนักและส่วนที่ป้องกันไม่ได้

ต้องแยกให้ชัดว่าส่วนใดของสมการ (5) มีที่มาจากแหล่งข้อมูล และส่วนใดเป็น สิ่งที่โครงการกำหนดเอง สี่พจน์แรก (J_V, J_f, J_R, J_P) มีฐานนอร์มัลไลซ์ที่ชี้นำโดยแหล่งข้อมูล EECON49-P4 หัวข้อ 4.1 คือ 0.10 pu, 0.50 Hz, 1.00 Hz s^{-1} และ 0.20 pu ตามลำดับ พร้อมสัดส่วนน้ำหนัก $w = [0.30, 0.30, 0.25, 0.15]$ แต่ *การขยายเป็นเจ็ดพจน์แล้วเฉลี่ยเท่ากัน ที่* $1/7$ *เป็น* `PROJECT_DERIVED` *ทั้งหมด* กล่าวคือน้ำหนักของ J_{SCR}, J_{lock} และ J_{GRA} ไม่มีเอกสารต้นทางรองรับเป็นรายพจน์ นี่คือจุดอ่อนเชิงที่มาที่รายงานนี้ระบุตรงไปตรงมาแทนที่จะกลบไว้

ในคลังโค้ดมีตัวปรับน้ำหนักแบบ design-time อยู่จริงคือ `scripts/reporting/optimize_agsi_weights.m` (จัดชั้นเป็น `NUMERICAL_METHOD`, ใช้ random search ร่วมกับ coordinate descent) ต้องแจ้งให้ชัดว่า **ผลลัพธ์ของตัวปรับนี้ ไม่ได้ถูกนำมาใช้** ตัวเลขทั้งหมดในรายงานนี้ผลิตจากน้ำหนักเท่ากัน $1/7$ ตามสมการ (5) การเปิดเผยเช่นนี้เป็นข้อบังคับตามกฎความซื่อตรงเชิงตัวเลขของโครงการ การซ่อนเครื่องมือปรับจูนที่มีอยู่ไม่ใช่ทางเลือก

3.2 การออกแบบดัชนีใหม่: severity บวก hard gate

การตัดสินใจสลับโหมดมีเป้าหมายเดียวคือ *คืนผู้กำหนดแรงดันและความถี่ให้ระบบ* ดังนั้นการ ออกแบบใหม่จึงเก็บไว้ใน objective ต่อเนื่องเฉพาะสองปริมาณนั้น และลดทุกอย่างที่เหลือลงเป็น *การทดสอบความยอมรับได้* (admissibility test) แบบผ่าน/ไม่ผ่าน เหตุผลเชิงหลักการคือ ปริมาณอย่างขีดจำกัดกระแสหรือความแข็งแรงของโครงข่ายไม่ใช่ "ความรุนแรงที่แลกเปลี่ยนกันได้" กับความเบี่ยงเบนแรงดัน แต่เป็นเงื่อนไขที่ต้องไม่ละเมิด การใส่มันเป็นพจน์ถ่วงน้ำหนักทำให้ ค่าความรุนแรงที่สูงมากในพจน์หนึ่งถูก "เฉลี่ยกลบ" โดยพจน์อื่นได้ ซึ่งผิดความหมายทางฟิสิกส์ ค่าความรุนแรงใหม่คือ

$$S_i = \min(1, \max(0,\ w_V J_V + w_f J_f)), \qquad J_V = \frac{|V - V_{ref}|}{\Delta V_{base}}, \quad J_f = \frac{|f - f_0|}{\Delta f_{base}}, \tag{6}$$

โดย $\Delta V_{base} = 0.10$ pu และ $\Delta f_{base} = 0.50$ Hz เป็น `SOURCE_DEFINED` ส่วน $w_V = w_f = 0.5$ ที่มี $w_V + w_f = 1$ ได้จากการนำสัดส่วนต้นทาง $0.30 : 0.30$ มานอร์มัลไลซ์ใหม่ จึงไม่เหลือน้ำหนักอิสระที่กำหนดเองแม้แต่ตัวเดียว ความหมายเชิงกายภาพของ S_i คือ "ระยะห่างจากจุดทำงานปกติ วัดเป็นสัดส่วนของแบนด์ที่ยอมรับได้" ค่า $S_i = 1$ หมายถึงเบี่ยงเบน เต็มแบนด์ทั้งแรงดันและความถี่พร้อมกัน

พจน์เดิมที่เหลือทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็น hard not-to-exceed gate ที่คืนค่า $L_k \in \{0, 1\}$ ไม่ใช่ต้นทุนถ่วงน้ำหนักอีกต่อไป

ตารางที่ 3: เงื่อนไขความยอมรับได้ การสลับโหมดต้องผ่านทุก gate พร้อมกัน

Gate	เงื่อนไข	ความหมาย	การจัดชั้น
RoCoF	$\lvert df/dt\rvert \le 1.0$ Hz s^{-1}	ยอมรับได้เชิงอัตราการเปลี่ยน	SOURCE_DEFINED
การตามกำลัง	$\lvert P_{ref} - P\rvert \le 0.20$ pu	ความเป็นไปได้ของ dispatch	SOURCE_DEFINED
ความแข็งแรงโครงข่าย	$SCR \ge SCR_{crit}$	ขอบเขตความถูกต้องของ GFL	SOURCE_DEFINED
PLL lock	$\lvert v_q\rvert \le 0.10$ pu	สุขภาพการซิงโครไนซ์	PROJECT_DERIVED
Reference	$GRA = 1$	มีผู้กำหนดมุม/ความถี่อยู่	PROJECT_DERIVED
กระแส	$\lvert I\rvert \le I_{max}$	ขีดจำกัดคอนเวอร์เตอร์	SOURCE_DEFINED

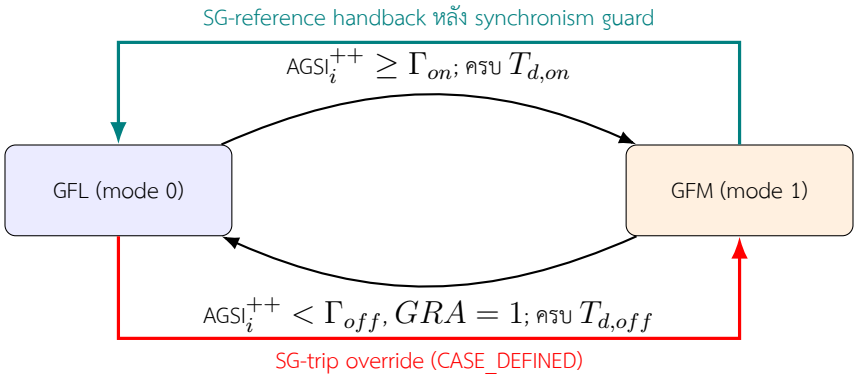
กฎการสลับจึงกลายเป็น

$$\text{GFL} \to \text{GFM}: \quad S_i \ge \Gamma_{on} \ \wedge \ \bigwedge_k L_k \ \text{ ครบ } T_{d,on}, \qquad \text{GFM} \to \text{GFL}: \quad S_i \le \Gamma_{off} \ \wedge \ \bigwedge_k L_k \ \text{ ครบ } T_{d,off}, \tag{7}$$

โดยยังคงใช้ค่า hysteresis และ dwell เดิม สัญลักษณ์ $\bigwedge_k L_k$ คือการ AND ทุก gate เข้าด้วยกัน ผลคือ *ทุกน้ำหนักตอนนี้เป็นค่าจากแหล่งข้อมูลหรือถูกตรึงด้วยการนอร์มัลไลซ์* และทุกปริมาณ ที่เหลือเป็นขีดจำกัดที่ตีพิมพ์ไว้ ไม่ใช่สัมประสิทธิ์ที่จูนขึ้นเอง

ต้องย้ำว่าการออกแบบนี้ถูก **freeze ไว้ที่นี่ก่อนการรันใหม่ใด ๆ** สมการ (6)–(7) *ไม่ได้ถูกใช้ผลิตตัวเลขใดเลย* ในรายงานฉบับนี้ ตัวเลขทั้งหมดยังมาจากสมการ (5) แบบเจ็ดพจน์เฉลี่ยเท่ากัน การประกาศไว้ล่วงหน้าเช่นนี้ป้องกันการเลือกน้ำหนักย้อนหลังให้เข้ากับผลที่ได้แล้ว

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

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega, \tag{8}$$

$$2H\Delta\dot{\omega} = P_m - P_e - D\Delta\omega, \tag{9}$$

$$T'_{d0}\dot{E}'_q = E_{fd} + c_d E''_q - d_d E'_q, \tag{10}$$

$$T'_{q0}\dot{E}'_d = c_q E''_d - d_q E'_d, \tag{11}$$

$$T''_{d0}\dot{E}''_q = E'_q - E''_q - (X'_d - X''_d) I_d, \tag{12}$$

$$T''_{q0}\dot{E}''_d = E'_d - E''_d + (X'_q - X''_q) I_q. \tag{13}$$

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:

$$T_{SV}\dot{P}_{SV} = -P_{SV} + P_c - \frac{\Delta\omega}{R}, \tag{14}$$

$$T_{CH}\dot{P}_m = -P_m + P_{SV}. \tag{15}$$

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

$$x_{IBR} = \begin{bmatrix} x_{GFM}^T & x_{GFL}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{20}, \tag{16}$$

โดย state vector ของสอง branch เรียงตรงกับ production code ดังนี้

$$\begin{aligned} x_{GFM} = [&\Delta\omega_m, \delta_{IT}, x_w, x_E, \delta_{PLL}, x_{PLL}, P_{inv,f}, I_{d,inv,f}, Q_{inv,f}, \\ &V_{inv,f}, I_{q,inv,f}, \delta_{IT,max}, \delta_{IT,min}]^T, \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} x_{GFL} = [&V_{t,f}, P_f, I_{q,cmd,f}, P_{ord}, \\ &V_{LVPL,f}, I_{p,reg}, I_{q,reg}]^T. \end{aligned} \tag{18}$$

สำหรับ GFM, $\Delta\omega_m$ คือ speed deviation ของ virtual synchronous machine, δ_{IT} คือมุม VSM เทียบ PLL, x_w คือ washout state, x_E คือ voltage-PI integrator, δ_{PLL}, x_{PLL} คือมุมและ integrator ของ PLL, ตัวแปรลงท้าย f คือค่าผ่าน measurement filter

และ $\delta_{IT,max/min}$ คือขอบเขตมุมจาก active-current limiter สมการ state หลักที่ใช้จริงคือ

$$2H\Delta\dot{\omega}_m = P_{ref,inv} - P_{inv,f} - (1/m_p + D_1)\Delta\omega_m - D_2(\Delta\omega_m - x_w), \tag{19}$$
$$\dot{x}_w = \omega_D(\Delta\omega_m - x_w), \tag{20}$$
$$\dot{\delta}_{PLL} = \omega_0(k_{p,PLL}v_q + k_{i,PLL}x_{PLL}), \tag{21}$$
$$\dot{x}_{PLL} = v_q, \tag{22}$$
$$\dot{\delta}_{IT} = \omega_0\Delta\omega_m - \dot{\delta}_{PLL}, \tag{23}$$
$$\dot{x}_E = V_{ref} - V_{inv,f}, \tag{24}$$
$$T_{pf}\dot{P}_{inv,f} = \kappa P - P_{inv,f}, \tag{25}$$
$$T_{If}\dot{I}_{d,inv,f} = \kappa I_d - I_{d,inv,f}, \tag{26}$$
$$T_{Qf}\dot{Q}_{inv,f} = \kappa Q - Q_{inv,f}, \tag{27}$$
$$T_{Vf}\dot{V}_{inv,f} = |V| - V_{inv,f}, \tag{28}$$
$$T_{If}\dot{I}_{q,inv,f} = \kappa I_q - I_{q,inv,f}, \tag{29}$$
$$\dot{\delta}_{IT,max} = k_I(I^{SS}_{d,max} - I_{d,inv,f}), \tag{30}$$
$$\dot{\delta}_{IT,min} = k_I(-K_e I^{SS}_{d,max} - I_{d,inv,f}). \tag{31}$$

เมื่อชนขอบเขตแล้วอนุพันธ์ที่พยายามดัน state ออกนอกขอบเขตจะถูก hold ตาม conditional anti-windup ในโค้ด กล่าวให้ชัดคือกฎ conditional hold นิยามว่า

$$\text{hold}(x, \dot{x}^{raw}, x_{lo}, x_{hi}) = \begin{cases} 0, & (x \geq x_{hi} \text{ และ } \dot{x}^{raw} > 0) \text{ หรือ } (x \leq x_{lo} \text{ และ } \dot{x}^{raw} < 0), \\ \dot{x}^{raw}, & \text{กรณีอื่น}, \end{cases} \tag{32}$$

กล่าวคือ *ตรึงเฉพาะทิศทางที่จะดันออกนอกขอบเขต แต่ยังปล่อยให้กลับเข้ามาได้ทันที* กฎนี้ใช้กับ δ_{IT} (ขอบเขต $[\delta_{IT,min}, \delta_{IT,max}]$) และกับ $\delta_{IT,max}$, $\delta_{IT,min}$ เอง (ขอบเขต $[0, \delta_{max}]$ และ $[-\delta_{max}, 0]$) โดย $\delta_{max} = \arcsin\left(X_L I^{SS}_{max}\right)$ ซึ่งโค้ดตรวจโดเมน $|X_L I^{SS}_{max}| \leq 1$ และ fail-closed หากละเมิด เมื่อ $\texttt{ESFlag} = 0$ จะได้ $\dot{\delta}_{IT,min} = 0$ ตายตัว

ขนาดแรงดันภายใน E_{VSM} ไม่ได้เป็นตัวแปรอิสระ แต่มาจาก Q–V droop รวมกับ voltage PI แล้วผ่านการ clamp:

$$E^{raw}_{VSM} = V_{ref} - m_q Q_{inv,f} + k_{pv}\left(V_{ref} - V_{inv,f}\right) + k_{iv}x_E, \tag{33}$$
$$E_{VSM} = \text{clamp}\left(E^{raw}_{VSM}, E_{min}, E_{max}\right). \tag{34}$$

จุดที่ต้องเน้นคือ *ขอบเขต* E_{min}, E_{max} *ไม่ใช่ค่าคงที่* แต่คำนวณใหม่ทุกขั้นเวลาจาก สถานะปัจจุบัน เพื่อให้กระแสแกน q ไม่เกินขีดจำกัด:

$$E_{min} = \sqrt{\left(V_{inv,f} - I^{SS}_{q,max}X_L\right)^2 + \left(I_{d,f}X_L\right)^2}, \tag{35}$$
$$E_{max} = \sqrt{\left(V_{inv,f} + I^{SS}_{q,max}X_L\right)^2 + \left(I_{d,f}X_L\right)^2}, \tag{36}$$

โดยขีดจำกัดกระแสแบ่งตาม $\texttt{PQFlag}$: เมื่อให้ลำดับความสำคัญแกน d จะได้ $I^{SS}_{d,max} = k_f I^{SS}_{max}$ และ $I^{SS}_{q,max} = \sqrt{\max\left(\left(I^{SS}_{max}\right)^2 - I^2_{d,f}, 0\right)}$ ส่วนกรณีตรงข้าม สลับบทบาทของสองแกน การป้องกัน integrator windup ของ x_E ใช้กฎเดียวกับ (32) คือ $\dot{x}_E = 0$ เมื่อ E^{raw}_{VSM} อยู่นอกขอบเขตแล้วและอนุพันธ์ยังผลักไปทิศเดิม

มุมที่ใช้จริงคือ $\delta_{VSM} = \delta_{PLL} + \text{clamp}(\delta_{IT}, \delta_{IT,min}, \delta_{IT,max})$ เหตุที่เก็บ δ_{IT} แบบ *สัมพัทธ์กับ PLL* แทนที่จะเก็บมุมสัมบูรณ์ ก็เพื่อให้แหล่งมุมสองทาง (PLL กับ virtual machine) สอดคล้องกัน โดยการลบ $\dot{\delta}_{PLL}$ ออกจาก $\dot{\delta}_{IT}$ ทำให้ได้ $\dot{\delta}_{VSM} = \omega_0\Delta\omega_m$ พอดี ไม่นับ การเคลื่อนที่ของ PLL ซ้ำสองครั้ง

ส่วนแหล่งแรงดันหลัง impedance ใช้การอิ่มตัวแบบวงกลม (circular saturation) กล่าวคือ *จำกัดขนาดแต่รักษาทิศทางของเฟเซอร์กระแสไว้*:

$$I_{unc} = \frac{E_{VSM}e^{j\delta_{VSM}} - V}{\kappa\left(R_e + jX_L\right)}, \qquad I_{sys} = \begin{cases} I_{unc}, & |I_{unc}| < I^F_{max}/\kappa, \\ \dfrac{I^F_{max}}{\kappa}\dfrac{I_{unc}}{|I_{unc}|}, & \text{กรณีอื่น}, \end{cases} \tag{37}$$

โดย E_{VSM} มาจาก Q–V droop และ voltage PI ตาม (33) ก่อนผ่านขอบเขต $E_{min/max}$; PLL จะ freeze ($\dot{\delta}_{PLL} = \dot{x}_{PLL} = 0$) เมื่อ $|V| < V_{PLL,frz}$ เพื่อไม่ให้แรงดันที่ยุบตัวขับตัวติดตามมุมให้หลุด จึงเป็น GFM ที่สร้างมุม/ความถี่ ไม่ใช่การกำหนด algebraic PF slack bus ขึ้นมาใหม่ กระแสที่ป้อนกลับเข้าสมการ filter ทั้งห้าตัวคือ I_{sys} *หลัง* การอิ่มตัวแล้ว ไม่ใช่ I_{unc} จึงไม่มีสถานะใดที่ "เห็น" กระแสเกินขีดจำกัด

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:

$$T_{rv}\dot{V}_{t,f} = |V| - V_{t,f}, \qquad T_p\dot{P}_f = \kappa P - P_f, \tag{38}$$

$$\dot{P}_{ord} = \text{rate}_{[dP_{min},dP_{max}]}\left(\frac{\text{sat}(P_{ref,inv}) - P_{ord}}{T_{pord}}\right), \tag{39}$$

$$T_{iq}\dot{I}_{q,cmd,f} = I_{q,cmd} - I_{q,cmd,f}, \qquad T_{fltr}\dot{V}_{LVPL,f} = |V| - V_{LVPL,f}, \tag{40}$$

$$T_g\dot{I}_{p,reg} = I_{p,target} - I_{p,reg}, \qquad T_g\dot{I}_{q,reg} = I_{q,cmd,f} - I_{q,reg}. \tag{41}$$

$I_{p,target}$ 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

ต่างจาก GFM ตรงที่ branch GFL เป็นแบบ *current source*: มันไม่มี state ของ PLL เลย เพราะจัดแนวเข้ากับมุมของแรงดันที่ขั้วโดยตรงเชิงพีชคณิต กระแสที่ฉีดเข้าโครงข่ายคือ

$$I = \frac{\left(I_{p,reg}\,\gamma(|V|) - jI_{q,reg}\right)e^{j\angle V}}{\kappa}, \tag{42}$$

โดย $e^{j\angle V}$ คือการหมุนเข้าสู่กรอบของแรงดันขั้ว ซึ่งเป็นเหตุผลเชิงโครงสร้างว่าทำไม GFL จึง *ตาม* โครงข่าย ไม่ใช่ *สร้าง* โครงข่าย ถ้าไม่มีอุปกรณ์ใดกำหนดมุมอ้างอิงเลย สมการนี้ก็ไม่มีมุมให้อ้างอิง นี่คือสาเหตุที่ GRA ต้องเป็น hard gate ไม่ใช่พจน์ถ่วงน้ำหนัก ฟังก์ชัน γ คือ low-voltage-point gain แบบเชิงเส้นเป็นช่วงของ REGC_A และเมื่อ $|V| > V_{olim}$ จะมี high-voltage reactive clamp $I_q \leftarrow \max\left(I_{olim}, I_q - K_{hv}(|V| - V_{olim})\right)$ เพิ่มเข้ามา

คู่คำสั่งของ REEC_A คำนวณจากการหาร power order ด้วยแรงดันที่กรองแล้ว บวกด้วยกระแสรีแอกทีฟ ช่วงแรงดันตก:

$$I_{p,0} = \frac{P_{ord}}{\max\left(V_{t,f}, 0.01\right)}, \qquad I_{q,0} = \frac{\kappa Q_{ref}}{\max\left(V_{t,f}, 0.01\right)} + I_{q,inj}, \tag{43}$$

$$I_{q,inj} = \text{sat}\left(K_{qv}\,\text{db}(V_{ref,0} - V_{t,f}), I_{ql1}, I_{qh1}\right), \tag{44}$$

โดยพจน์ $I_{q,inj}$ ทำงานเฉพาะเมื่อ $V_{t,f} < V_{dip}$ หรือ $V_{t,f} > V_{up}$ เท่านั้น นอกช่วงนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ส่วน db คือ deadband ช่วง $[dbd_1, dbd_2]$ ซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนแรงดันเล็กน้อยไม่กระตุ้นการฉีดรีแอกทีฟ ตัวหาร $\max(V_{t,f}, 0.01)$ เป็น `NUMERICAL_METHOD` ที่ประกาศไว้เพื่อกันการหารด้วยศูนย์ ตอนแรงดันยุบ ไม่ใช่การปรับแต่งแบบจำลอง

จากนั้นเป็นการจัดสรรกระแสตามลำดับความสำคัญ เมื่อ $\texttt{PQFlag} = 1$ (ให้ลำดับความสำคัญ กำลังจริง) จะได้

$$I_p = \text{sat}\left(I_{p,0}, 0, I_{max}\right), \qquad |I_q| \le \min\left(I_{max}, \sqrt{\max\left(I_{max}^2 - I_p^2, 0\right)}\right), \tag{45}$$

คือ *สงวนความสามารถให้กำลังจริงก่อน แล้วจึงยกกำลังรีแอกทีฟเท่าที่วงกลมขีดจำกัดยังเหลือ* ส่วนกรณี $\texttt{PQFlag} = 0$ สลับลำดับกัน กระแสที่ควบคุมทั้งสองจึงไล่ตามคำสั่งผ่าน converter lag พร้อมขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนตามแหล่งข้อมูล

$$T_g\dot{I}_{p,reg} = I_p^{tgt} - I_{p,reg}, \qquad \dot{I}_{p,reg} \le r_{rpwr}, \tag{46}$$

$$T_g\dot{I}_{q,reg} = I_{q,cmd,f} - I_{q,reg}, \qquad \dot{I}_{q,reg} \in [I_{qr,min}, I_{qr,max}], \tag{47}$$

โดย I_p^{tgt} คือ I_p ที่ผ่านคุณลักษณะ LVPL แล้วเมื่อเปิดสวิตช์ `Lvplsw` คือ $I_p^{tgt} = \min\left(I_p, \text{LVPL}(V_{t,f})\right)$ ซึ่ง LVPL เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นเป็นช่วงที่เป็นศูนย์เมื่อ $V \le Z_{erox}$ เพิ่มเชิงเส้นจนถึง L_{vpl1} ที่ $V \ge B_{rkpt}$ และถูกยกพื้นที่ศูนย์เมื่อ $V \le V_{lvpnt0}$ ค่า gain, ค่าคงที่เวลา และขีดจำกัดทุกตัวข้างต้นเป็น `SOURCE_DEFINED` มีเพียงตัวกันหารศูนย์ 0.01 pu ที่เป็น `NUMERICAL_METHOD`

5.4 การเลือก branch ตามโหมด

เลข mode 0/1 จึงเป็นตัวเลือก active branch ไม่ใช่แบบจำลองทั้งหมด กล่าวให้เป็นดัชนีอย่างชัดเจน: ในโหมด GFL ดัชนีที่ทำงานคือ $14{:}20$ และ $\dot{x}_{1:13} = 0$; ในโหมด GFM ดัชนีที่ทำงานคือ $1{:}13$ และ $\dot{x}_{14:20} = 0$; ในโหมด tripped อนุพันธ์ทั้งยี่สิบตัวเป็นศูนย์และกระแสที่ฉีดเป็นศูนย์พอดี branch ที่ active เท่านั้นเข้าสู่ dynamic solve แต่ state ทั้ง 20 ตัวคงอยู่เสมอ เพื่อทำ state mapping ตอน transfer และชุดดัชนีที่ active ถูก *ถามจากตัวอุปกรณ์* ไม่ได้ hard-code ไว้ในตัวอินทิเกรเตอร์ ผังการเรียงสถานะข้างต้นจึงไม่ถูกทำซ้ำในสองที่ ทั้งสอง branch ใช้ registered current injection ที่ผูกกับ full network KCL หลังสลับโหมดต้องแก้ algebraic right limit ใหม่ และหาก KCL ไม่ผ่าน transaction จะ rollback/fail-closed

6 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการสลับโหมด: อะไรถูกแก้ ณ ขณะเปลี่ยนโหมด

หัวข้อนี้ตอบคำถามที่สำคัญที่สุดเชิงคณิตศาสตร์โดยตรง: *ถ้าระหว่างที่ SG ยังอยู่ในระบบเราเดิน สมการเชิงอนุพันธ์แบบ* $x_{i+1} = x_i + h \cdot (\cdots)$ *แล้วเมื่อระบบเปลี่ยนจาก SG ไปเป็น IBR การเรียกซ้ำนั้นเกิดอะไรขึ้น และอะไรถูกแก้จริง ณ วินาทีนั้น* คำตอบมีสามส่วน และเป็นรูปแบบเดียวกัน ที่ใช้กับทั้งการปลด SG, การสลับ GFL↔GFM และการปิด SG กลับเข้าระบบ

6.1 ระบบที่แก้อยู่เป็น DAE ไม่ใช่ ODE

ระหว่างเหตุการณ์ (คือช่วงที่โหมดไม่เปลี่ยน) ระบบไม่ใช่สมการเชิงอนุพันธ์สามัญล้วน แต่เป็นระบบ เชิงอนุพันธ์-พีชคณิต (differential–algebraic, DAE) ชนิด semi-explicit index-1

$$\dot{x} = f_q(x, y, u), \tag{48}$$

$$0 = g_q(x, y, u) = Y_q V - I_{bus}(x, y). \tag{49}$$

ความหมายของสัญลักษณ์แต่ละตัวต้องชัดเจน เพราะการอธิบายผิดจุดนี้ทำให้ทั้งหัวข้อผิดตามกันหมด

- x คือเวกเตอร์ *state เชิงอนุพันธ์* ที่ถูกแก้ *ภายในขั้นเวลาเดียวกัน* ประกอบด้วย SG หก state ทางแม่เหล็กไฟฟ้า บวก IBR สี่ตัว $\times$ 20 state รวมเป็น 86 state ส่วน state ของ prime mover สองตัว (P_{SV}, P_m) *ไม่ได้* เป็นตัวไม่รู้ค่าของ Newton แต่เดินหน้าด้วยการอัปเดตแบบเอกซ์โพเนนเชียลเชิงวิเคราะห์แบบตรึงอินพุต คือ

$$P_{SV}(t+h) = P_c^* + (P_{SV} - P_c^*)\, e^{-h/T_{SV}}, \qquad P_c^* = \mathrm{sat}\left(P_{ref} - \frac{\Delta\omega}{R}, P_{min}, P_{max}\right), \tag{50}$$

  พร้อมสูตรคู่กันสำหรับ P_m ที่แยกกรณี $T_{SV} = T_{CH}$ ออกเพื่อเลี่ยงการหารด้วยศูนย์ สอง state นี้จึงเข้าสู่ (48) *ผ่านอินพุต* u *เท่านั้น* ไม่ใช่ในฐานะ ตัวไม่รู้ค่า

- u จึงบรรจุ T_m และ E_{fd}

- y คือ state ของโครงข่าย เก็บเป็นแรงดันบัสแบบพิกัดฉาก คือคู่ (V_x, V_y) ต่อบัส

- q คือ **โหมดไม่ต่อเนื่อง** (discrete mode) ซึ่งเป็นทูเพิลของ (โทโพโลยีโครงข่าย, โหมดของอุปกรณ์แต่ละตัว, สถานะเบรกเกอร์)

สมการ (49) คือ residual แบบ all-KCL เต็มรูปเหนือแถวจริงทั้ง $2n_b$ แถว (ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของทุกบัส) โดยมี *โมดูลเดียว* เป็นเจ้าของสมการนี้ ขณะที่อุปกรณ์ แต่ละตัวส่งมาเพียงสไลซ์ f_q ของตนเองและกระแสที่ตนฉีด I_{inj} เท่านั้น อุปกรณ์ ไม่เคยแก้ไขหรือคืนค่า residual ของโครงข่ายเอง

การแบ่งเวลาใช้กฎ *implicit trapezoidal* ดังนั้นขั้นเวลาปกติ *ไม่ใช่* การเรียกซ้ำ แบบชัดแจ้ง $x_{k+1} = x_k + h\, f(\cdot)$ อย่างที่มักเขียนกันโดยย่อ แต่เป็นระบบไม่เชิงเส้นที่ต้องแก้ พร้อมกันทั้งคู่

$$x_{k+1} - x_k - \frac{h}{2}\left[f_q(x_k, y_k, u) + f_q(x_{k+1}, y_{k+1}, u)\right] = 0, \tag{51}$$

$$g_q(x_{k+1}, y_{k+1}, u) = 0, \tag{52}$$

โดยแก้หา (x_{k+1}, y_{k+1}) ไปด้วยกัน เส้นทาง EMF6 ใช้จำนวนรอบ corrector คงที่เท่ากับสาม ตามสัญญาของโครงการ ประเด็นสำคัญที่ต้องเน้นคือ **ทั้ง f_q และ g_q มีตัวห้อย q** กล่าวคือมันเป็นสมการ *ของโหมดไม่ต่อเนื่องปัจจุบัน* เมื่อเกิดเหตุการณ์สลับ q เปลี่ยน ดังนั้น *ตัวสมการเองเปลี่ยน* ไม่ใช่แค่ค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยน

6.2 การเปลี่ยนผ่าน ณ ขณะสลับโหมด

นี่คือคำตอบตรงของคำถาม: สมการ (51)–(52) **ไม่ได้ถูกเดินต่อข้ามเหตุการณ์** ณ เวลาสลับ t_e วิถีของระบบเกิดการเปลี่ยนผ่านแบบ hybrid-DAE สามขั้นตามลำดับ

$$q^- \longrightarrow q^+ \qquad \text{การกระโดดของโหมดไม่ต่อเนื่อง,} \tag{53}$$

$$x(t_e^+) = R_{q^-\to q^+}\big(x(t_e^-), y(t_e^-)\big) \qquad \text{แผนที่รีเซ็ตสถานะ,} \tag{54}$$

$$0 = g_{q^+}\big(x(t_e^+), y(t_e^+), u\big) \ \text{ แก้หา } y(t_e^+) \qquad \text{การแก้พีชคณิตลิมิตขวา.} \tag{55}$$

อธิบายทีละขั้น:

ขั้น (53) เลือกเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์หลังเหตุการณ์ Y_{q^+} *โดยตรงจากชุดโทโพโลยีที่ประกาศไว้ล่วงหน้าผ่านตัวระบุ* (`topology_id`) ไม่ใช่การไปค้นหาโทโพโลยีใหม่ที่เวลา $t + \epsilon$ พร้อมกันนั้นจะ commit แผนที่โหมดอุปกรณ์และ สถานะเบรกเกอร์เป็น **ทรานแซกชันเดียว**: ตรวจความถูกต้องของการอัปเดตทั้งก้อนให้ครบก่อน จึงเขียนฟิลด์ใด ๆ และหากการตรวจล้มเหลว สถานะที่คืนออกมาจะ `isequaln` กับสถานะขาเข้า พอดี กล่าวคือ *ไม่มีการเปลี่ยนแปลงบางส่วนค้างไว้*

ขั้น (54) อธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

ขั้น (55) แก้ *เฉพาะบล็อกพีชคณิตเท่านั้น* ด้วย damped Newton ที่มี backtracking line search โดย *ตรึง* x *ไว้ที่* $x(t_e^+)$ *ไม่ขยับ* และยอมรับผลลัพธ์ ต่อเมื่อ residual ของ KCL เข้าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขั้นเวลา มิฉะนั้นทรานแซกชันทั้งก้อน จะ rollback จากนั้นการอินทิเกรตเชิงอนุพันธ์จึงเริ่มใหม่จาก $\big(x(t_e^+), y(t_e^+)\big)$ ในขั้นเวลาถัดไป

ผลที่ตามมาคือ **ณ เวลา t_e มีสองแซมเปิล**: ลิมิตซ้าย (t_e^-) และลิมิตขวา (t_e^+) ตารางและกราฟทั้งหมดในรายงานนี้เก็บ *ลิมิตขวา* การไม่แยกสองแซมเปิลนี้คือกับดักที่ทำให้ คำนวณ RoCoF ผิดโดยการหารด้วย $\Delta t = 0$

6.3 แผนที่รีเซ็ตคือความต่อเนื่องที่ขั้ว ไม่ใช่การคัดลอกสถานะ

สมบัติเชิงโครงสร้างที่สำคัญที่สุดคือ **มิติของเวกเตอร์สถานะไม่เคยเปลี่ยน** IBR แต่ละตัว เป็นซูเปอร์เซ็ต 20 state ที่มิติคงที่ ซึ่ง state GFM $1{:}13$ และ state GFL $14{:}20$ มีอยู่พร้อมกันตลอดเวลา การเปลี่ยนโหมดเพียง *เลือกใหม่ว่าบล็อกย่อยใดทำงาน* ส่วนบล็อก ที่ไม่ทำงานถูกตรึงไว้พอดี $\dot{x}_{inactive} = 0$ ตามกฎ frozen inactive-state (`PROJECT_DERIVED`: ความต่อเนื่องบวกการลด residual เชิงพีชคณิต) ดังนั้น *ตัวอินทิเกรตไม่เคยเปลี่ยนขนาด และจาโคเบียนไม่เคยเปลี่ยนขนาด* นี่คือเหตุผลเชิงคณิตศาสตร์ ว่าทำไม SG จึงกลับเข้าระบบได้ในภายหลัง: *ไม่มีสิ่งใดถูกลบออกทางโครงสร้างตอนปลด*

แผนที่รีเซ็ต R ใน (54) ส่งผ่าน *เงื่อนไขทางกายภาพที่ขั้ว* ไม่ใช่พิกัดของสถานะ และเป็นของอุปกรณ์เอง (อุปกรณ์เปิด callback ให้ ตัวจัดการไม่ hard-code สมการใด)

$$V_{bus} = y_{2b-1} + j y_{2b}, \qquad I^- = I_{inj}\big(x^-, y, u, q^-\big), \tag{56}$$

$$S^- = V_{bus}\,\overline{I^-}, \qquad P^- = \Re S^-, \quad Q^- = \Im S^-, \tag{57}$$

$$x^+\big|_{target} = \mathcal{I}_{q^+}\big(V_{bus}, P^-, Q^-\big), \qquad x^+\big|_{inactive} = x^-\big|_{inactive}, \tag{58}$$

ตามด้วยการทดสอบยอมรับแบบ fail-closed

$$\big|I_{inj}\big(x^+, y, u, q^+\big) - I^-\big| \le 10^{-10}, \tag{59}$$

ซึ่งหากละเมิดจะยกข้อผิดพลาด `ibr:transfer_maps:currentContinuity` และทรานแซกชัน ไม่ commit ตัว $\mathcal{I}_{q^+}$ คือตัวเริ่มค่าแบบสมดุล/แบบถ่ายโอนของ branch เป้าหมายเอง (GFM ใช้ `transfer_initialize` ซึ่งไม่บังคับแถว $|V| = V_{ref}$ แบบสถิต เพราะทันทีหลัง การรบกวนแรงดันขั้วยังไม่เท่าค่าอ้างอิง)

ปริมาณคงตัวที่ถูกพาข้ามการสลับจึงเป็นคู่ที่ขั้ว (V, I) *หรือกล่าวเทียบเท่าคือ* (P, Q) *ไม่ใช่เวกเตอร์สถานะ* ไม่มีการคัดลอกมุม PLL ออกจาก branch GFL เพราะ branch GFL ไม่มี state ของ PLL เลย มุมของ GFM ถูก *อนุมานย้อนกลับ* จาก V_{bus} และ I^- ส่วนดัชนีบัส b ถูกแก้จากตำแหน่งบัสที่อุปกรณ์ลงทะเบียนไว้ ดังนั้นแผนที่นี้ไม่มีการฝัง หมายเลขบัสแบบตายตัวไว้ในโค้ด

ความหมายเชิงกายภาพของ (59) คือ *โครงข่ายต้องไม่ "เห็น" การกระโดด ของกระแสที่จุดเชื่อมต่อ* ณ ขณะสลับ ถ้าเห็น นั่นหมายถึงเราเปลี่ยนแหล่งจ่ายกลางอากาศแบบ ไม่รักษาสมดุล ซึ่งจะทำให้ลิมิตขวาไม่ใช่คำตอบของระบบเดิม เกณฑ์ 10^{-10} จึงเข้มกว่าเกณฑ์ การยอมรับ KCL ของขั้นเวลา เพราะเป็นข้อกำหนดเชิงเอกลักษณ์ ไม่ใช่ความคลาดเคลื่อนของตัวแก้

6.4 การปลด SG และการปิดกลับที่มีเงื่อนไขประตู

ตอนปลด SG นั้น **state ทั้งหกของ SG ไม่ได้ถูกลบออกจาก** x branch เบรกเกอร์เปิด เพียงแทนพีชคณิตของสเตเตอร์ที่ต่ออยู่ด้วยฟิสิกส์วงจรเปิด: $I_d = I_q = 0, T_e = 0$, แรงบิดทางกลถูกตรึงที่ค่าก่อนปลด และฟลักซ์สลายตัวแบบวงจรเปิด

$$2H\Delta\dot{\omega} = T_m^{froz} - D\Delta\omega, \qquad T''_{d0}\dot{E}''_q = E'_q - E''_q, \qquad T''_{q0}\dot{E}''_d = E'_d - E''_d, \tag{60}$$

กล่าวคือพจน์ $(X'_d - X''_d)I_d$ และ $(X'_q - X''_q)I_q$ หายไปพร้อมกับกระแสสเตเตอร์ ขณะที่ $\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega$ ยังเดินต่อ *โรเตอร์จึงหมุนอิสระต่อไป* ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้การซิงโครไนซ์กลับในภายหลังมีความหมายทางกายภาพ ไม่ใช่การ “เสก” เครื่องกำเนิดขึ้นมาใหม่ ในทางกลับกันสมดุลแบบสถิตไม่รวม SG ที่เบรกเกอร์เปิด เพราะ T_m ที่ถูกตรึงไว้โดยทั่วไปไม่มีรากสถิต แต่ TS ยังอินทิเกรต state เหล่านี้ผ่านสมการวงจรเปิดข้างต้นได้ตามปกติ

การปิดกลับเป็นแบบ **มีเงื่อนไขประตู (gated) ไม่ใช่กำหนดตามตาราง** ตัวประตูเปรียบเทียบ เฟเซอร์แรงดันบัสของโครงข่ายกับ *แรงดันเหนี่ยวนำวงจรเปิดของ SG* คือ $\left(E''_q - jE''_d\right)e^{j\delta}$ และต้องการให้

$$|\Delta V| \le 0.05\ \text{pu}, \qquad |\Delta f| \le 0.001\ \text{pu}, \qquad |\Delta\theta| \le 10^\circ, \tag{61}$$

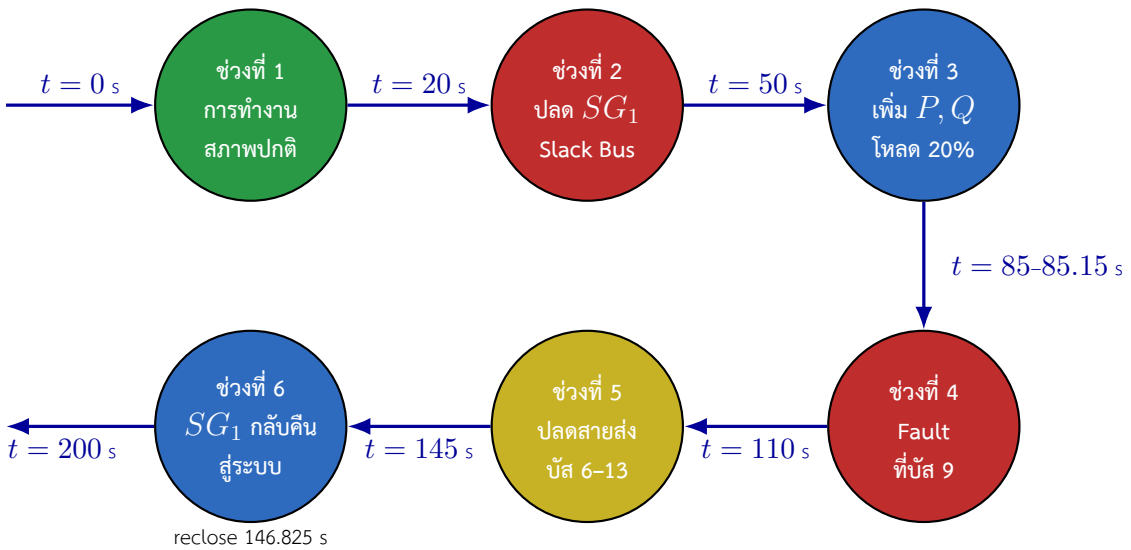
เขียนรวมเป็น *ระยะขอบมีเครื่องหมาย* (signed margin) เพียงค่าเดียว

$$m = \min\left(0.05 - |\Delta V|,\ 0.001 - |\Delta f|,\ 10^\circ - |\Delta\theta_{wrap}|\right) \ge 0 \tag{62}$$

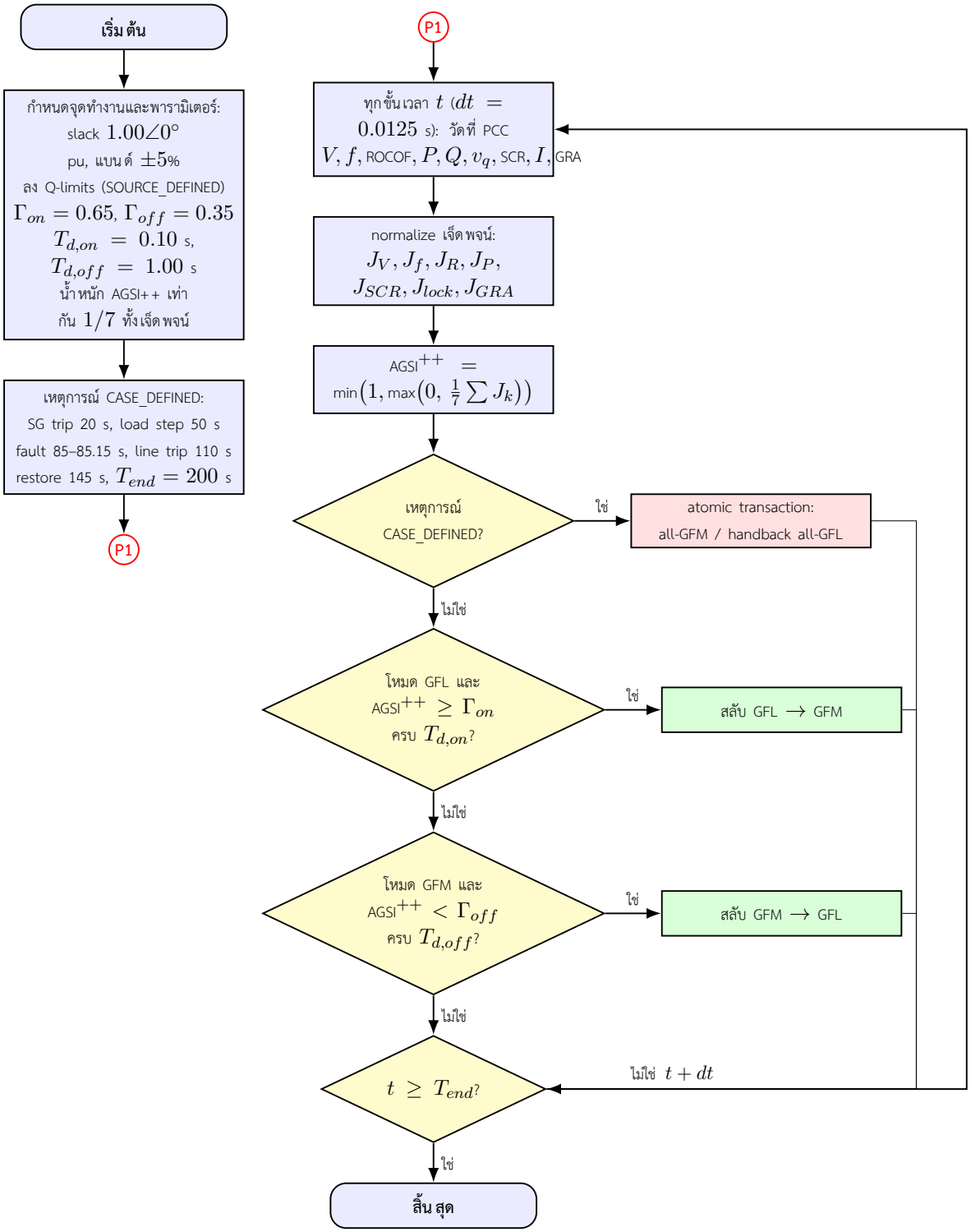
โดยต้องเป็นจริงต่อเนื่องครบ dwell 0.5 s การใช้ min ทำให้เงื่อนไขที่แย่ที่สุดเป็นตัวกำหนด ผลเสมอ ($m < 0$ แปลว่ามีอย่างน้อยหนึ่งเงื่อนไขไม่ผ่าน) และค่า m ยังบอก *ระยะห่างจาก การผ่าน* ได้ด้วย ซึ่งเป็นข้อมูลที่ค่าบูลีนล้วนให้ไม่ได้ ส่วน $\Delta\theta_{wrap}$ คือผลต่างมุม ที่ห่อเข้าช่วง $[-180^\circ, 180^\circ)$ เพื่อไม่ให้ผลต่าง 359° ถูกตีความว่าห่างมาก ทั้งที่จริงห่างเพียง 1°

ผลลัพธ์เชิงตีความที่สำคัญคือ **เวลาปิดที่ร้องขอเป็นเพียงเวลาที่เร็วที่สุดที่ *อาจ* ปิดได้** ไม่ใช่เวลาที่ปิดจริง: คำขอที่ 145.000 s ให้ผลการปิดที่ยอมรับจริงที่ 146.825 s ความหน่วง 1.825 s นี้เป็นผลลัพธ์ของฟิสิกส์และประตู ไม่ใช่ค่าคงที่ที่ตั้งไว้ จึงไม่มีการอ้าง ในรายงานนี้ว่าเวลาเหตุการณ์เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับขั้นเวลา

7 ลำดับเหตุการณ์ 200 วินาทีและหลักฐาน transaction



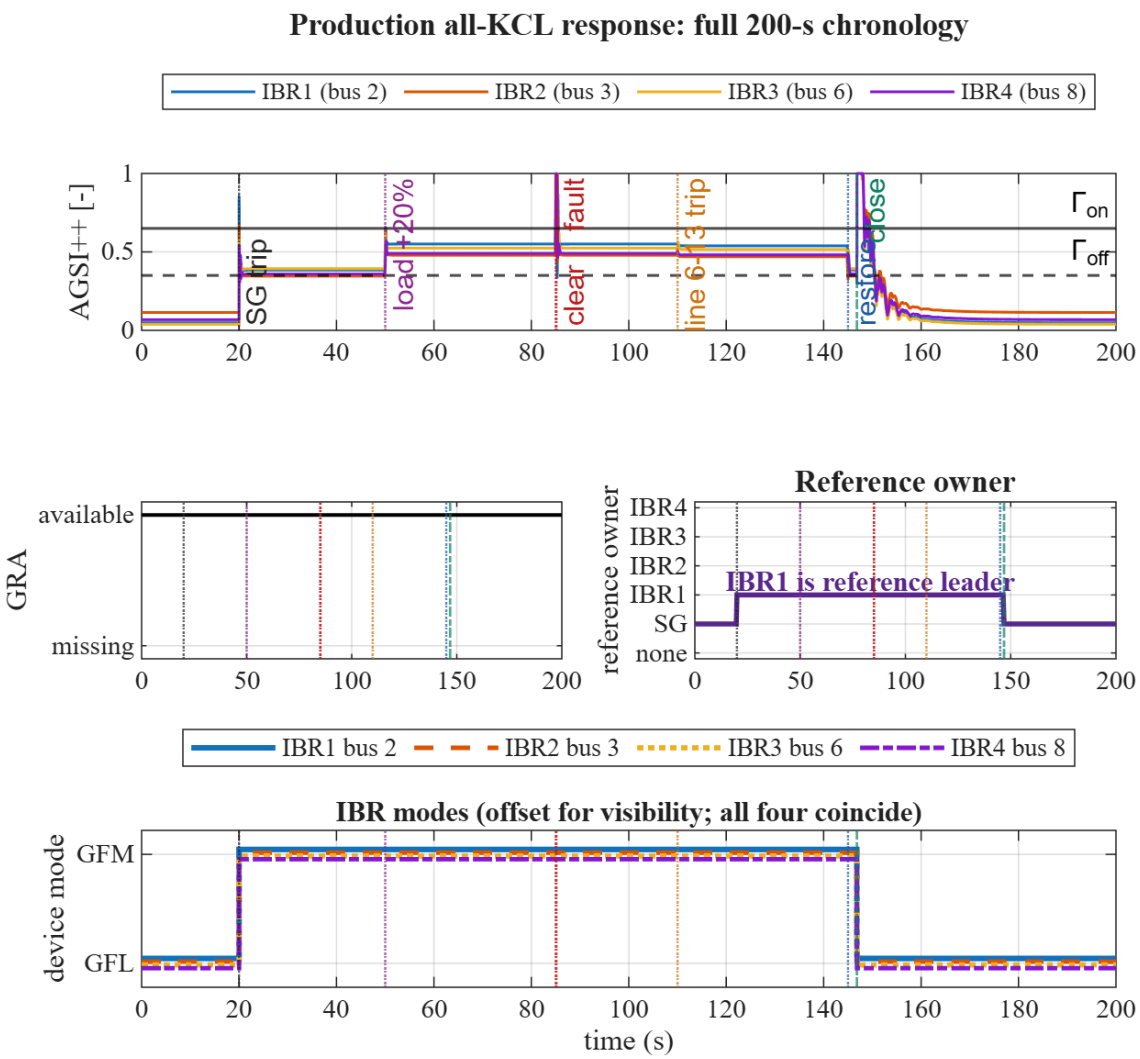
รูปที่ 3: ลำดับเหตุการณ์รบกวนหกช่วงของการจำลอง 200 s จาก accepted production event log: ระบบปกติที่ 0 s, ปลด SG ที่ 20 s, เพิ่มโหลด P, Q 20% ที่ 50 s, fault บัส 9 ช่วง 85–85.15 s, เปิดสาย 6–13 ที่ 110 s และ SG กลับคืนที่ 145 s (reclose 146.825 s)



รูปที่ 4: ผังการทำงานกลยุทธ์สลับโหมด GFL/GFM: คอลัมน์ซ้ายกำหนดจุดทำงาน พารามิเตอร์ และ เหตุการณ์ CASE_DEFINED; คอลัมน์ขวาเป็น online loop ที่วัดสัญญาณที่ PCC ทุกขั้นเวลา คำนวณ AGSI++ เจ็ดพจน์ตามสมการ (5) ที่ `ibr.SwitchableIbr6` ใช้จริง และตัดสินใจสลับโหมดตาม threshold และ dwell หรือผ่าน atomic transaction

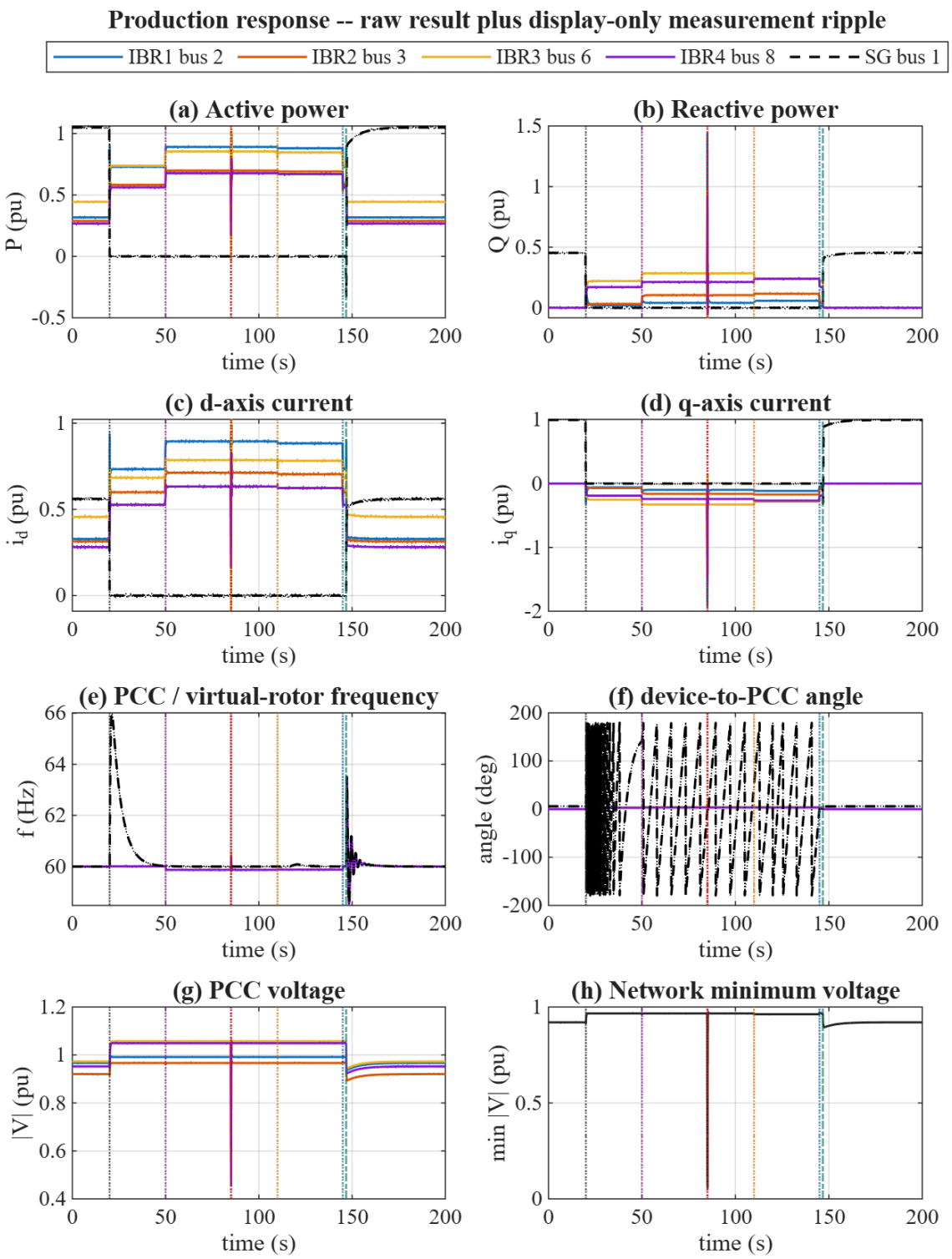
ลำดับที่ใช้ตรงตามชุด verify: 0–20 s ระบบปกติ; 20 s ปลด SG; 50 s เพิ่มโหลด active/reactive ทุกจุด 20%; 85–85.15 s fault บัส 9 ด้วย $Z_f = 0.01 + j0.01$ pu; 110 s เปิดสาย 6–13; 145 s คืนสายและโหลดฐานพร้อมส่ง earliest SG-close request; 146.825 s SG ปิดจริงหลัง guard; 200 s สิ้นสุดการจำลอง จุด fault ใช้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

8 กราฟ AGSI, mode, SG และ IBR ครบ 200 วินาที

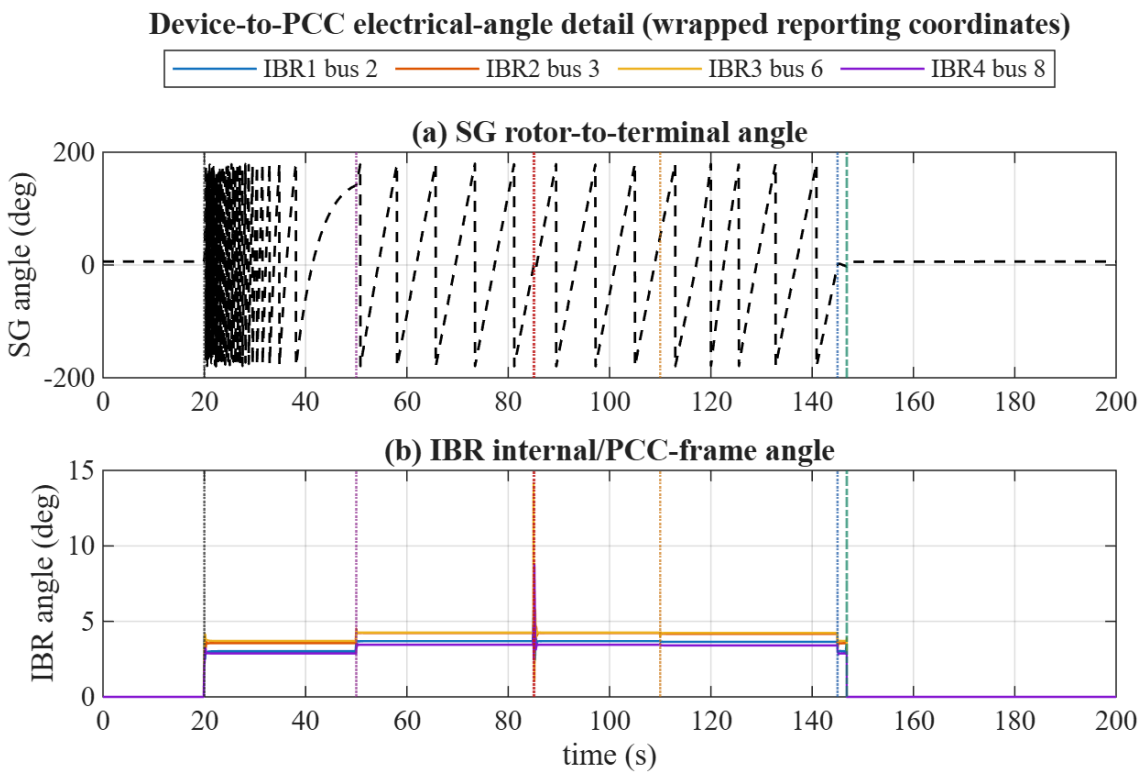


รูปที่ 5: AGSI++ ที่ถูกจำกัดใน $[0, 1]$, GRA, reference owner และ mode timeline ของ IBR1–IBR4 รวมในกราฟเดียว โหมดเป็น GFL ก่อน 20 s, GFM ช่วง 20–146.825 s และกลับ GFL หลัง 146.825 s เส้นทั้งสี่ใช้รูปแบบต่างกัน (ทึบ/ประ/จุด/ประ-จุด) และเลื่อนแนวตั้งเล็กน้อยเพื่อการมองเห็นเท่านั้น (± 0.045 ของพิกัดโหมด 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 Γ_{on} หลัง transient ไม่ได้สั่งกลับทันที เพราะการคืน GFM⟶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

9 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° ตามลำดับ หลัง handback ที่ 200 s:

- SG online และ IBR ทั้งสี่อยู่ GFL;
- ช่วงแรงดันของทุกบัสเป็น 0.9203–1.0000 pu โดยบัส SG/IBR อยู่ในแบนด์ ± 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 9.99×10^{-9}, subdivision สูงสุดหนึ่งชั้น และทุก state finite.

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

10 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

11 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

12 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