รายงานโครงการระบบไฟฟ้ากำลัง

การไหลของกำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการสลับโหมด GFL/GFM อัตโนมัติ

กรณีศึกษา IEEE 14-bus: PF, SSSA, TS และ IBR แบบผสม

Mr. Phichitchai Jueajan (66010569)

Mr. Pakkapol Phdungdan (66010612)

อาจารย์ที่ปรึกษา: Dr. Tossaporn Surinkaew

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สิงหาคม พ.ศ. 2569

บทคัดย่อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตข้ออ้าง

บทคัดย่อ

โครงการนี้พัฒนาสายงานคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังภายในโครงการเดียว ตั้งแต่การแก้ สมการการไหลของกำลัง (PF) ไปยังจุดสมดุลของระบบสมการเชิงอนุพันธ์–พีชคณิต (DAE) การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (SSSA) และการจำลองโดเมนเวลา (TS) ด้วยตัวแก้สมการ MATLAB แบบฐานล้วนของโครงการ จากนั้นนำ DAE เดียวกันไปทดสอบ เครือข่าย IEEE-14 ที่มี synchronous generator (SG) หนึ่งเครื่องและ inverter-based resource (IBR) สี่ตัว ซึ่งสลับระหว่าง grid-following (GFL) และ grid-forming (GFM) โดย supervisor ที่มี hysteresis, dwell และ guard สำหรับเจ้าของมุมอ้างอิง

ผลหลักมาจาก cache หกแขนชุดเดียวที่ commit `c56ff9f` และสร้างรูปใหม่ ด้วยตัวอ่าน cache ที่ตรวจ hash ก่อนและหลังอ่าน ค่าในตารางและรูปจึงเป็นค่าที่ ตัวแก้ยอมรับจริง ไม่มีการทำให้เรียบ การเติมสัญญาณ หรือการตัดข้อมูล การรัน adaptive ไปถึง 250.000 วินาที ปิด SG ได้และ reclose ที่ 159.2519 วินาที ขณะที่แขนที่ตรึง GFM สี่ตัวตั้งแต่ต้นหยุดที่ 25.485 วินาที ตัวเลขเหล่านี้เป็น *PROJECT_RESULT* ของแบบจำลอง ไม่ใช่การรับรองการใช้งานภาคสนาม

วัตถุประสงค์ (1) ทำให้สมการ PF–SSSA–TS ใช้ residual และลำดับตัวแปรเดียวกัน (2) แสดงหลักฐาน independent ของ equilibrium, Schur complement และ finite-difference (FD) Jacobian (3) ตรวจสัญญา IBR GFL/GFM และการถ่ายโอน state โดยไม่ให้กระแสกระโดด และ (4) รายงานผล chronology 250 วินาทีพร้อมการเปรียบเทียบนโยบายหกแขนอย่าง ตรวจสอบย้อนกลับได้

ขอบเขต ข้อ อ้าง ข้อมูล network และ เหตุการณ์ ที่ ระบุ ว่า **SOURCE_DEFINED** หรือ **CASE_DEFINED** ถูก ใช้ ตาม ต้นทาง ผล ของ ตัว แก้ เป็น *PROJECT_RESULT* และ สมการ/ การ ปิด ที่ เจ้าของ โครงการ กำหนด ถูก ระบุ เป็น **PROJECT_DERIVED** หรือ **NUMERICAL_METHOD** รายงาน นี้ ไม่ อ้าง grid-code compliance, protection coordination, EMT accuracy หรือ readiness สำหรับการใช้งานจริง

การทำซ้ำ รายงานภาษาไทยอ่าน macro ที่สร้างจาก cache โดยตรงและอ่าน PNG ที่ตัวสร้าง รายงานสร้างขึ้นใหม่ ทุกค่าในหน้าต่อไปจึงผูกกับ provenance เดียวกัน ไม่ใช่ การคัดตัวเลขจากรายงานฉบับก่อน

จุดเริ่มต้นของโครงการและ milestone สำคัญ

จุดเริ่มต้นคือปัญหาที่การสูญเสีย SG ทำให้โครงข่ายไม่มีแหล่งกำหนดแรงดัน อ้างอิง GFL ต้องอาศัย PLL ส่วน GFM สร้างมุมและแรงดันของตนเอง โครงการจึงวางสายงานแบบลำดับชั้น: PF สร้าง operating point, equilibrium ปิด KCL และ สมการ device, SSSA ตรวจการรบกวนเล็ก, TS ตรวจเหตุการณ์ขนาดใหญ่ และ supervisor ตัดสินใจ mode จาก state ที่ยอมรับแล้ว

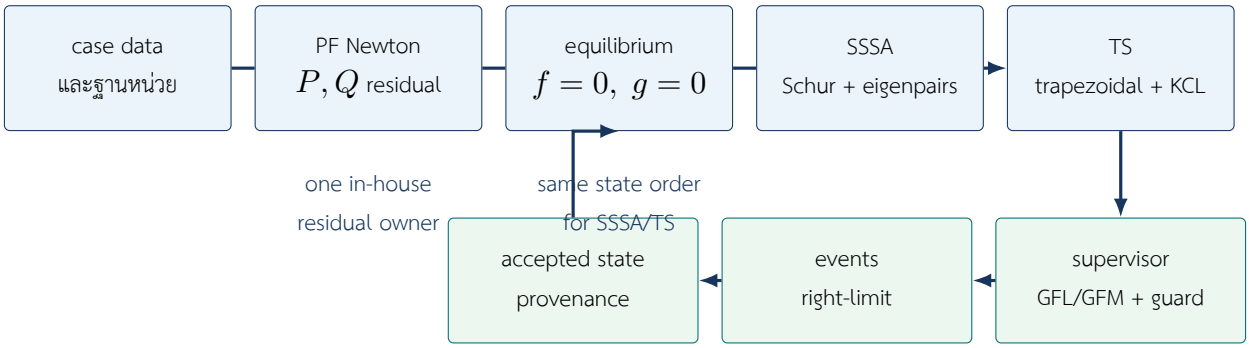
ตารางที่ 1: ลำดับพัฒนาการที่ใช้เป็นหลักฐานในรายงานนี้

ลำดับ	milestone	หลักฐานและความหมาย
1	สัญญา base และ bus type	power-case 1.0, bus 12 คอลัมน์, REF/PV/PQ เป็น 1/2/3
2	Ybus และ PF Newton	residual $[P, Q]$ มี mapping และ limit ที่ตรวจย้อนกลับได้
3	shared DAE	equilibrium, SSSA และ TS เรียก residual เดียวกัน
4	SSSA Schur	กำจัดตัวแปร algebraic ด้วย backslash และตรวจ conditioning
5	FD/eigenpair gates	ตรวจ plateau, conjugate pair, gauge และ participation
6	implicit trapezoidal TS	corrector แก้ differential และ KCL พร้อมกัน
7	event landing	แต่ละ event ลงตรง grid และเปลี่ยน topology แบบ right-limit
8	GFL-RMS10 SMIB	ปิด nonlinear PLL, current plant และ power identity แยกกรณี
9	GFM no-PLL SMIB	ปิด VSG angle และ voltage law โดยไม่มี PLL แฝง
10	dual-mode 17-state	plant ร่วมและ controller block ที่ active ได้ทีละ branch
11	IEEE-14 integration	SG bus 1 กับ IBR bus 2, 3, 6, 8 ใน composite DAE
12	six-arm snapshot	เปรียบเทียบ adaptive, pinned และ no-adaptation จาก cache เดียว

หลักวินัยข้อมูล external PSAT, PGAz และเอกสารอ้างอิงใช้เป็น oracle หรือ comparison เท่านั้น ไม่ถูกเรียกจาก production path และผลจากภายนอกไม่ถูกป้อนกลับไปเลือก state, parameter, correction หรือ gate การเปลี่ยนแปลงของรายงานนี้จำกัดอยู่ที่ report-only generator และเอกสาร จึงไม่เปลี่ยน numerical contract

จุดที่ไม่ถูกนำมาอ้าง ตัวนับ trial ที่ถูกปฏิเสธใน search path มี defect record เปิดอยู่ จึงไม่นำ ตัวเลขดังกล่าวมาสนับสนุนข้ออ้างใดในรายงานนี้ การเปรียบเทียบใช้ accepted samples, horizon, residual และสถานะ convergence ซึ่งเป็นค่าที่ตรวจซ้ำได้

สถาปัตยกรรม PF ถึงการสลับโหมด และหลัก numerical integrity



รูปที่ 1: สถาปัตยกรรมที่ใช้จริง: PF สร้างจุดตั้งต้น, equilibrium ปิด DAE, SSSA และ TS ใช้สมการเดียวกัน และ supervisor เปลี่ยน mode เฉพาะที่ accepted right-limit

ตัวแปรและสัญญา ให้ x เป็น differential state, y เป็น rectangular bus-voltage state เรียงเป็น $[\mathrm{Re}\, V_1, \mathrm{Im}\, V_1, \ldots]$ และ u เป็น input ของ device ระบบแก้

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

กระแสของ device เป็นบวกเมื่อฉีดเข้าสู่ network และ $S = VI^* = P + jQ$ บน system base สัญญานี้ไม่เปลี่ยนเมื่อเปลี่ยน เครื่องมือ comparison

การปิดแบบ fail-closed ทุก stage ตรวจ finite state, residual, rank/conditioning และ mapping ก่อน commit หากเงื่อนไขไม่ผ่านจะหยุดและเก็บ failure status ตัวอย่างสำคัญคือ การไม่มี voltage-forming source หลัง SG trip และการที่ Newton step ลง domain ไม่ได้รับการแก้ด้วยการผ่อน gate

การจำแนกค่า SOURCE_DEFINED ใช้เมื่อแหล่งอ้างอิงระบุสมการหรือค่าโดยตรง CASE_DEFINED ใช้กับ case และ event PROJECT_DERIVED ใช้กับ closure ที่ต้องพิสูจน์ด้วยสมการ NUMERICAL_METHOD ใช้กับวิธีแก้และ tolerance และ ASSUMED_DIAGNOSTIC ใช้กับดัชนีที่แสดงเพื่อวิเคราะห์เท่านั้น

วิธีแก้ Power Flow: สมการ ตัวแปร และเกณฑ์หยุด

สำหรับ bus i ให้ $V_i = |V_i|e^{j\theta_i}$ และ $Y = G + \mathrm{j}B$ สมการกำลังที่ production ใช้คือ

$$P_i = \sum_k |V_i||V_k|(G_{ik}\cos\theta_{ik} + B_{ik}\sin\theta_{ik}), \tag{2}$$

$$Q_i = \sum_k |V_i||V_k|(G_{ik}\sin\theta_{ik} - B_{ik}\cos\theta_{ik}), \tag{3}$$

โดย $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$ และ $P_i^{\text{spec}} = P_{G,i} - P_{L,i}, Q_i^{\text{spec}} = Q_{G,i} - Q_{L,i}$

ตารางที่ 2: บทบาทของ bus และ unknown ใน Newton–Raphson

ประเภท	ค่าที่กำหนด	ค่าที่แก้หรือรายงาน
REF	$\lvert V\rvert, \theta$	P, Q เป็นผลลัพธ์ของ balance
PV	$P, \lvert V\rvert$	θ แก้; Q รายงานและตรวจ limit
PQ	P, Q	$\theta, \lvert V\rvert$ แก้

Mismatch vector เรียงเฉพาะค่าที่ไม่ถูกกำหนด:

$$r_{\text{PF}} = \begin{bmatrix} P^{\text{spec}} - P^{\text{calc}} \\ Q^{\text{spec}} - Q^{\text{calc}} \end{bmatrix}, \qquad J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} = \frac{\partial r_{\text{PF}}}{\partial[\theta \;\; |V|]}. \tag{4}$$

แต่ละรอบแก้ $J\Delta z = r_{\text{PF}}$ ด้วย backslash แล้วอัปเดต $z \leftarrow z + \Delta z$ จน $\|r_{\text{PF}}\|_\infty$ ต่ำกว่า tolerance ที่ประกาศไว้

Limits และการหยุด เมื่อ reactive generation ของ PV ออกนอก $[Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}]$ ค่า Q จะถูก ตรึงที่ limit และ bus เปลี่ยนเป็น PQ ก่อนแก้ต่อ REF ไม่ถูกใช้เป็น unknown แรงดันและมุมที่ได้จึงยังเป็น output ของสมการ ไม่ใช่ค่าที่ป้อนกลับจาก oracle การประกอบ Y รวม series admittance, shunt, line charging และ transformer tap ตาม case data และตรวจ power balance $P_{\text{gen}} = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}}$

หน่วย ค่ากำลังใช้ pu บนฐาน 100 MVA ของ case; แรงดันและกระแสใช้ pu; มุมแสดงเป็น องศาแต่สมการใช้เรเดียน ความแตกต่างของ frame หรือ sign จึงถูกตรวจที่ residual ก่อนจะนำไป SSSA หรือ TS

หลักฐาน independent PF production เป็น Newton ภายในโครงการ ส่วน PSAT/MATPOWER/PGAz ถูกใช้เพื่อ อ่านหรือเปรียบเทียบข้อมูลเท่านั้น การตรงกันของค่าภายนอกจึงเป็น diagnostic ไม่ใช่ source ของ correction

หลักฐาน PF: IEEE-14, RTS-24 และ comparison ที่รายงานตามจริง

ตารางที่ 3: ผล PF จาก artifact ที่สร้างสดและ mapping เดียวกับ production

กรณี	สถานะ	รอบ Newton	$\|r_{\text{PF}}\|_\infty$	P_G (pu)	balance
IEEE-14	converged	5	6.33521×10^{-15}	2.72393	$P_L = 2.59000,\ P_{\text{loss}} = 0.133933$
RTS-24	converged	5	2.30926×10^{-12}	29.0125	$P_L = 28.5000,\ P_{\text{loss}} = 0.512464$

IEEE-14 เครือข่ายหลักใช้ bus ID จาก case14 และรักษา semantic ของ REF/PV/PQ ก่อน ส่งผลให้ equilibrium ของ SG bus 1 และ IBR bus 2, 3, 6, 8 ถูกสร้างใน coordinate ชุดเดียวกับ composite DAE ค่า residual ที่ต่ำกว่า 10×10^{-14} pu เป็นหลักฐาน numerical convergence ของ operating point ไม่ใช่หลักฐานว่า parameter ของ SG เป็นค่าจากโรงงาน

RTS-24 RTS-24 ใช้เป็นกรณีข้ามขนาดเพื่อจับ error ใน bus/branch mapping, power balance และการแยก state ออกจาก algebraic variable ไม่ได้ใช้ผล RTS-24 ไป tune IEEE-14 การเทียบข้ามกรณีจึงเป็นการตรวจ implementation contract

การเทียบ PSAT และ PGAz ใน fixed-grid IEEE-14 fault test ค่า PSAT–Ours สูงสุดคือ $\Delta_{\text{COI}} = 9.5711 \times 10^{-3}$ องศา, $\Delta\omega = 3.8160 \times 10^{-6}$ pu, $\Delta P_e = 0.042171$ MW และ $\Delta V = 3.1793 \times 10^{-5}$ pu ซึ่งอยู่ใน primary tolerance ที่ประกาศ PGAz ทำงานจบแต่ต่างมากกว่า: $\Delta_{\text{COI}} = 0.616348$ องศาและ $\Delta P_e = 2.467655$ MW จึงรายงานเป็น secondary diagnostic ไม่ได้ซ่อน ด้วยการผ่อน tolerance

PGAz FAIL ตามจริง artifact ระบุว่า PGAz execution ผ่าน แต่ corrector ไม่ส่ง residual และ gate ของ trajectory comparison ไม่ผ่าน การเขียนว่า "ผ่านทั้งหมด" จะเกิน หลักฐาน จึงใช้คำว่า comparison diagnostic เท่านั้น

วิธี SSSA: DAE, Schur complement, eigenpairs และ participation

ที่ equilibrium (x_0, y_0) มี $f(x_0, y_0) = 0$ และ $g(x_0, y_0) = 0$ การรบกวนอันดับหนึ่งให้

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \tag{5}$$

เมื่อ J_{yy} อยู่ใน free algebraic set, production กำจัด Δy ด้วย

$$A = J_{xx} - J_{xy}\left(J_{yy}\right)^{-1} J_{yx} \quad \Longrightarrow \quad A = J_{xx} - J_{xy}\left(J_{yy} \backslash J_{yx}\right) \tag{6}$$

โดยรูปที่สองคือรูปที่ใช้จริงและไม่มีการสร้าง explicit inverse

FD Jacobian แต่ละ block ของ J ได้จาก central FD รอบ equilibrium ด้วย step ที่ตรึงไว้ การเลือก step อาศัย plateau ของ eigenvalues ที่วัดได้ ไม่ได้อาศัยการปรับให้ ตรงกับหนังสือหรือโปรแกรมอ้างอิง Eigenpair residual, conjugate pairing, conditioning และ reference-angle structure เป็น gates แยกกัน

Gauge และ reduction ระบบ autonomous มี rotational symmetry จึงมี zero mode ของการเลื่อนมุมร่วม full matrix เก็บ mode นี้ ส่วน COI reduction ใช้เมื่อโจทย์ต้องการ modes ที่ตัด common motion การอ่าน damping ใช้

$$\lambda = \sigma + \mathrm{j}\varpi, \qquad f_\lambda = \frac{|\varpi|}{2\pi}, \qquad \zeta = -\frac{\sigma}{|\lambda|}. \tag{7}$$

ถ้า Re $\lambda < 0$ mode ลดลง; ถ้าไม่ finite หรืออยู่อีกฝั่ง ต้อง fail-closed ไม่ตีความเป็น stable

Participation left/right eigenvectors ใช้เพื่อจัดอันดับ state ที่เด่นเท่านั้น หาก conditioning ไม่พอผล participation จะถูกทำเครื่องหมาย unavailable การจัดอันดับนี้ไม่ เปลี่ยน eigenvalue, candidate set หรือ solver state

หลักฐานจาก shared path SSSA เรียก DAE เดียวกับ TS บนลำดับ (x, y) เดียวกัน ดังนั้น residual ที่ถูก ตรวจใน SSSA ไม่ใช่ residual ที่สร้างขึ้นเพื่อรายงาน หลังจาก SSSA ผ่านจึงนำ equilibrium เดิมไปเริ่ม TS โดยไม่ copy ค่า eigenvalue หรือ reference table

หลักฐาน SSSA: residual, FD plateau, gates และ Padiyar discrepancy

ตารางที่ 4: ค่าหลักจาก SSSA validation artifact

แบบจำลอง	max $\lvert f_0 \rvert$	max $\lvert g_0 \rvert$	จำนวน state	จำนวน eigenvalue	FD plateau
Padiyar manual	1.249×10^{-15}	5.684×10^{-14}	16	16	1.686×10^{-7}
Padiyar AVR	9.215×10^{-13}	5.684×10^{-14}	20	20	5.799×10^{-9}
EMF6	1.665×10^{-15}	2.132×10^{-14}	24	24	1.078×10^{-7}

ค่าทั้งหมดต่ำกว่า 10×10^{-10} ที่ equilibrium และ eigenvalues finite ทุกตัว Schur reconstruction ของ Padiyar AVR ให้ความต่างเชิงตัวเลขเป็นศูนย์ และ J_{yy} มี rcond ประมาณ 9.74×10^{-3} สำหรับ Padiyar กับ 1.11×10^{-2} สำหรับ EMF6 จึงไม่ใช่การแก้ระบบที่เกือบ singular

FD plateau การเปรียบเทียบ $h = 10^{-5}$ กับ $h = 10^{-6}$ ให้ความต่าง physical modes ตามตาราง โดยค่าทั้งหมดต่ำกว่า 10×10^{-3} ที่ประกาศไว้ default step ของ production อยู่บน plateau นี้

Gate matrix รายการ gate ของ SSSA validation artifact ผ่านทั้งหมด ครอบคลุม shared DAE, state order/count, FD convergence, default-on-plateau, Schur solve, ไม่มี explicit inverse, gauge, conjugate pair, modal metrics, reference independence, provenance และ no external solver การทดสอบที่ บันทึกไว้คือ targeted 62 ผ่าน, 0 ไม่ผ่าน, 0 incomplete; ตัวเลขนี้เป็น evidence ของ code path เดิม ไม่ใช่การรันซ้ำเพื่อให้รายงานผ่าน

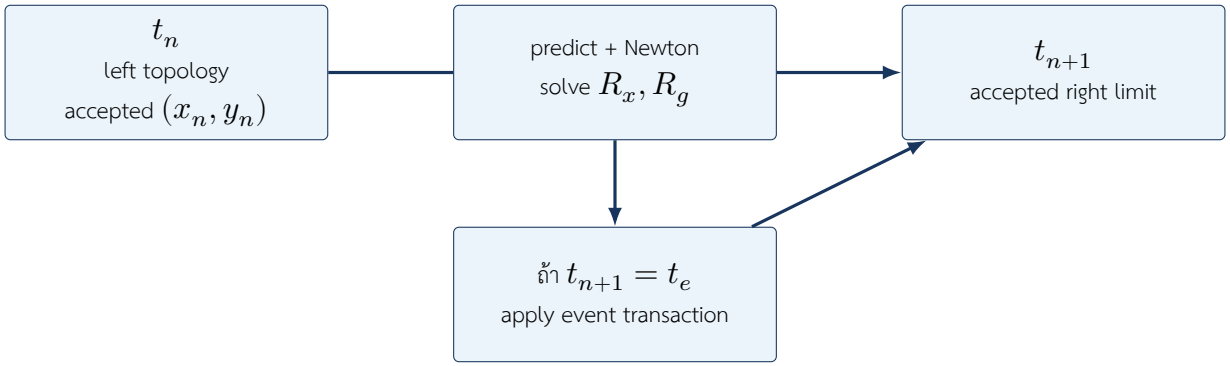
Padiyar discrepancy การจับคู่ Table 9.5 ของ Padiyar เป็น **ASSUMED_DIAGNOSTIC** แบบ greedy one-to-one เท่านั้น มี 18 physical roots และความต่างสูงสุดประมาณ 4.3×10^{-2} การตรวจ FD plateau อยู่ระดับ 10×10^{-7} จึงอธิบาย ความต่าง 4.3×10^{-2} ด้วย FD noise ไม่ได้ สาเหตุที่แท้จริงยังไม่ปิด อาจเกี่ยวกับ model, data, convention หรือ precision ของสิ่งพิมพ์ รายงาน ความต่างนี้ตรง ๆ และไม่ใช้เป็น acceptance gate

วิธี TS: implicit trapezoidal, corrector, event landing และ COI

สำหรับช่วงที่ topology คงที่ production ใช้ implicit trapezoidal:

$$R_x = x_{n+1} - x_n - \frac{h}{2}\left[f(t_n, x_n, y_n) + f(t_{n+1}, x_{n+1}, y_{n+1})\right] = 0, \qquad R_g = g(t_{n+1}, x_{n+1}, y_{n+1}) = 0. \tag{8}$$

Newton corrector แก้ $[R_x; R_g]$ พร้อมกันจน update และ residual ผ่าน ตัวแก้ EMF6 ใช้ corrector iteration คงที่สามรอบตาม contract ส่วน adaptive stepper ใช้ step-doubling เพื่อประมาณ local error และยอมรับ fine solution เมื่อ weighted error และ KCL residual ผ่าน



รูปที่ 2: แต่ละ step แก้ DAE บน topology เดียว; event ที่ลง grid ใช้ left topology สำหรับ arrival และ re-solve right topology แบบ atomic

Exact event landing ถ้า event อยู่ก่อนปลาย step จะลด h ให้ลงตรง event เสมอ ห้าม step เดียว คร่อมสอง topology เมื่อเปลี่ยน mode จะ carry plant state, initialize controller block ของปลายทาง และตรวจ terminal-current continuity

$$|I^+ - I^-| \le 10 \times 10^{-10}\ \text{pu}. \tag{9}$$

ถ้า right-limit Newton หรือ continuity gate ไม่ผ่าน transaction ถูก rollback ทั้งชุด

COI metrics สำหรับเครื่องที่มี inertia H_i ใช้ $\delta_{\text{COI}} = \sum_i H_i \delta_i / \sum_i H_i$ และ f_{COI} เป็น frequency metric ของระบบ การลบ common motion นี้ ใช้กับ comparison เท่านั้น ไม่เปลี่ยน state ที่ตัวแก้ integrate

Adaptive policy ตัวควบคุมเวลาเลือก h_{new} จาก error ที่ normalize ด้วย atol $+$ rtol max $|x|$ และจำกัดอัตราขยาย/หดตามค่าที่ประกาศ เมื่อ reject จะไม่เขียนทับ accepted state ไม่มี extrapolation ของ arm ที่หยุด ก่อน horizon

หลักฐาน TS: common grid, IEEE-14 และ RTS-24

ตารางที่ 5: ผล comparison บน common grid ที่ไม่ extrapolate

คู่เทียบ	metric	max $\lvert\Delta \mathrm{COI}\rvert$ (deg)	max $\lvert\Delta\omega\rvert$ (pu)	max $\lvert\Delta P_e\rvert$ (MW)	max $\lvert\Delta V\rvert$ (pu)
PSAT–Ours	IEEE-14	0.009571	3.816033×10^{-6}	0.042171	3.179264×10^{-5}
PGAz–Ours	IEEE-14	0.616348	2.916429×10^{-4}	2.467655	2.264528×10^{-3}
PSAT–Ours	RTS-24	0.0067685	4.6205×10^{-6}	0.082705	5.3538×10^{-6}

วิธีอ่านตาราง กริดเปรียบเทียบใช้ event และ sample time ที่มีอยู่จริงของแต่ละ solver ห้าม extrapolate ออกนอกช่วงที่ solver ให้มา ค่า PSAT–Ours ของ IEEE-14 อยู่ใต้ tolerance ที่ประกาศ จึงเป็น primary comparison ส่วน PGAz มี trajectory difference ใหญ่กว่าและ corrector residual ไม่พร้อมให้ยืนยัน ดังนั้นเป็น diagnostic เท่านั้น

RTS-24 เป็น held-out check RTS-24 ตรวจว่าการประกอบ network, constant-impedance conversion ที่ runtime, COI mapping และ event landing ไม่ผูกกับจำนวน bus ของ IEEE-14 ผลที่ต่างจาก PSAT ถูกพิมพ์เป็น metric ไม่ถูกใช้เพื่อเปลี่ยน solver

สิ่งที่ TS พิสูจน์และไม่พิสูจน์ TS พิสูจน์ว่า accepted DAE state มี residual และ event order ตามสัญญา แต่ไม่ได้พิสูจน์ hardware control, protection, unbalanced fault หรือ accuracy ของ switching waveform ระดับ EMT นอกจากนี้ fixed-step และ adaptive เป็น numerical routes ที่ต้องอ่านแยกกัน ไม่สรุปว่าการรันสั้นรับรอง horizon ยาว

ข้อสรุปหน้านี้: common-grid comparison ผ่านในส่วน PSAT primary ตามตัวเลขที่วัดได้ ส่วน PGAz ถูกเก็บไว้เพื่อบอกขอบเขตของความสอดคล้อง ไม่ใช่ ถูกลบหรือปรับ tolerance ให้ดูดี

พัฒนาการ IBR: GFL+PLL, GFM no-PLL, 17-state superset

IBR แต่ละตัวมี plant ร่วมและ controller สอง branch แต่ integrate branch เดียว ในเวลาใดเวลาหนึ่ง GFL ใช้ current control และ SRF-PLL ส่วน GFM ใช้ VSG swing และ voltage-forming loop การเลือก mode ไม่ได้หมายความว่าสอง controller ทำงานพร้อมกัน

$$x_{\text{GFL}} = [\,\delta_{\text{PLL}}, \xi_{\text{PLL}}, \xi_P, \xi_Q, \xi_{Id}, \xi_{Iq}\,], \tag{10}$$

$$x_{\text{GFM}} = [\,\delta_{\text{VSG}}, \omega_{\text{VSG}}, E, \xi_{Vd}, \xi_{Vq}, \xi_{Id}, \xi_{Iq}\,]. \tag{11}$$

plant ร่วมคือ (i_d, i_q, V_{dc}) และ source-current state I_{dc} ถูก append เป็นพิกัดที่ 17 สร้าง fixed superset 17 state

$$x_{\text{IBR}} \in \mathbb{R}^{17}, \qquad \mathcal{A}_{\text{GFL}} = \{1{:}9, 17\}, \quad \mathcal{A}_{\text{GFM}} = \{1{:}3, 10{:}16, 17\}. \tag{12}$$

ดังนั้น active count เป็น 10 หรือ 11 ไม่ใช่ 17 พร้อมกัน

GFL PLL ขับ v_q เป็นศูนย์และใช้ ω_{PLL} เป็น frame frequency outer P/Q loops สร้าง current reference ส่วน inner loops แก้ filter current ที่ equilibrium P และ Q ตรง setpoint จาก source

GFM no-PLL VSG ให้

$$M\dot{\omega}_{\text{VSG}} = \kappa P_{\text{ref}} - P_{\text{inv}} - D_v(\omega_{\text{VSG}} - 1), \qquad \dot{\delta}_{\text{VSG}} = \omega_b(\omega_{\text{VSG}} - 1). \tag{13}$$

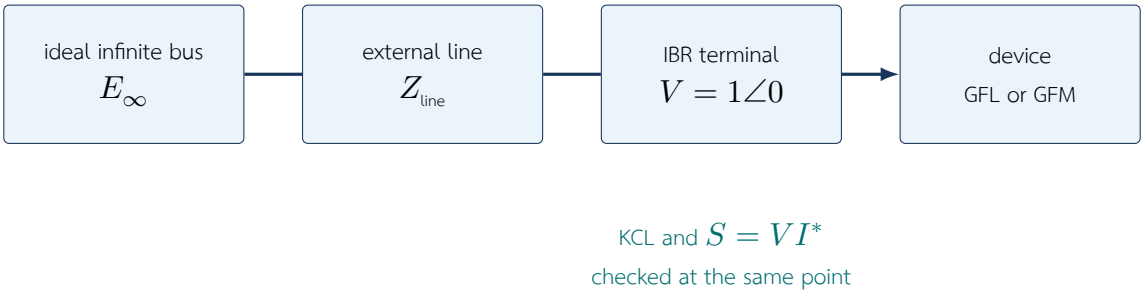
ไม่มี δ_{PLL} หรือ PLL integrator แฝง มุมจึงเกิดจาก state ของ VSG เท่านั้น

State transfer เมื่อ mode เปลี่ยน จะ carry (i_d, i_q, V_{dc}), map frequency ที่ physical frame และ initialize controller block ใหม่จาก (V, P, Q) ของ accepted state จากนั้นตรวจ current continuity และแก้ algebraic right-limit ใหม่ วิธีนี้ เปลี่ยน parameterisation ได้ แต่ไม่สร้าง current impulse ให้ network

ข้อสังเกตเรื่อง 17 state 17 คือขนาด container ที่คงที่เพื่อ ABI และ mapping ไม่ใช่จำนวน differential state ที่ integrate พร้อมกัน เมื่อรวม SG หก state และ IBR สี่ container จะมี 74 แถวใน composite state vector ของกรณี IEEE-14 นี้

SMIB: topology และสัญญาของ GFL-RMS10/GFM-no-PLL

SMIB ใช้เป็น diagnostic oracle แยกจาก multi-bus production path เพื่อทดสอบ device equation, equilibrium, SSSA และ event-free TDS โดยไม่ปะปนกับการเลือก candidate ใน IEEE-14 ทั้งสองกรณีใช้ terminal $V = 1\angle 0$ pu, $P = 0.40$ pu, $Q = 0.10$ pu, system base 100 MVA และ line $Z_{\text{line}} = 0.02 + \text{j}0.20$ pu



รูปที่ 3: SMIB topology ที่ใช้ทดสอบสองกรณีแยกกัน ไม่ได้ผสม GFL และ GFM ใน device เดียวกัน

ตารางที่ 6: สัญญาสองกรณี SMIB

หัวข้อ	GFL-RMS10	GFM-no-PLL
ตัวควบคุม	SRF-PLL, outer P/Q, filter current	VSG swing, Q–V, filter current
จำนวน state	10	4
frame angle	δ_{PLL}	δ_{VSG} จาก swing
ข้อห้าม	ไม่ใช้ angle ของ infinite bus เป็น state	ไม่มี PLL, PLL gain หรือ PLL freeze
บทบาท	current source ที่ต้องมี voltage reference	voltage-forming source

SMIB equilibrium ใช้ closed-form warm start แล้ว แก้ local residual ด้วย Newton ใน oracle ผล ของ SMIB จึง เป็น **ASSUMED_DIAGNOSTIC** ไม่ถูกใช้ ป้อนกลับไปเปลี่ยน production IEEE-14

เหตุผลที่ต้องแยกกรณี GFL และ GFM มี state order, frame และ source contract คนละแบบ หากรวมเป็น กรณีเดียวจะไม่รู้ว่าการเปลี่ยน spectrum มาจาก controller หรือจาก topology รายงานจึงใช้ SMIB เป็นการพิสูจน์ local mechanism แล้วค่อยนำ dual-mode container ไปตรวจใน composite IEEE-14

หลักฐาน SMIB: equilibrium, Schur, FD, eigenpairs และ power identity

ตารางที่ 7: ผล SMIB oracle จากไฟล์ diagnostic ที่ commit ใน repository

กรณี	$\|f_0\|_\infty$	$\|g_0\|_\infty$	rcond(J_y)	จำนวน λ	max Re λ	ผล TS
GFL-RMS10	2.790×10^{-13}	1.110×10^{-16}	0.8347	10	-11.23383	drift 0, error 7.700×10^{-6}
GFM-no-PLL	6.523×10^{-14}	2.082×10^{-16}	0.9216	4	-0.5554663	drift 0, error 2.866×10^{-5}

Schur-versus-direct error ของ GFL คือ 2.605×10^{-14} และของ GFM คือ 8.095×10^{-11} จึงยืนยันว่า A มาจาก elimination เดียวกับที่ระบุในสมการ ไม่ใช่ matrix ที่พิมพ์แยกจาก solver GFL มี fast PLL pole ประมาณ -3.371×10^5 s^{-1} และ GFM มี swing pair $-0.5555 \pm$j9.356 s^{-1} พร้อม real filter modes -100.9 และ -114.5 s^{-1}

FD และ eigenpairs ทั้งสองกรณีให้ finite Jacobian และ eigenvalues ครบตามจำนวน state GFM perturbation-halving ratio เท่ากับ 1.433×10^{-5} และ GFL ratio เท่ากับ 2.489×10^{-9} จาก TDS oracle ตัวเลขนี้แสดง local linear consistency ของ implementation ไม่ได้ประกาศว่า nonlinear large-disturbance จะเป็นเชิงเส้น

Nonlinear กับ linear เมื่อ perturbation มีขนาด 10^{-3}, ความต่าง nonlinear-vs-linear ของ GFM เท่ากับ 2.866×10^{-5} และของ GFL เท่ากับ 7.700×10^{-6} การตรวจ power identity ให้ error GFM 6.523×10^{-16} pu และ GFL เป็นศูนย์ภายใน precision ของ diagnostic

ขอบเขตความหมาย ผล GFL ที่มี PLL pole เร็วมากเป็นลักษณะของ local model ที่วัด ณ operating point นี้ ไม่ใช่เหตุให้ลบ eigenvalue หรือเปลี่ยน sign เพื่อให้ผ่าน ส่วน GFM ไม่มี PLL ตาม contract การที่ทั้งสองผลเป็นคนละกรณีจึงสำคัญกว่าการจัดอันดับว่า กรณีใด "ดีกว่า"

ระบบ IEEE-14: inventory, state count และ event schedule

กรณีหลักประกอบด้วย SG ที่ bus 1 และ IBR สี่ตัวที่ bus 2, 3, 6, 8 อุปกรณ์ถูก map ด้วย external bus ID แล้วค่อยสร้าง internal coordinate เครื่อง SG ใช้ EMF6 operational model โดย state ที่ integrate อยู่บน singular limit ของ E'_d จึงมี 5 active state จาก 6 coordinate ที่เก็บ

ตารางที่ 8: inventory ของอุปกรณ์และการ map state

ทรัพยากร	bus	branch	จำนวน active state
SG1	1	EMF6	5 (จาก 6 coordinate)
IBR1	2	GFL/GFM dual-mode	10 หรือ 11 จาก container 17
IBR2	3	GFL/GFM dual-mode	10 หรือ 11 จาก container 17
IBR3	6	GFL/GFM dual-mode	10 หรือ 11 จาก container 17
IBR4	8	GFL/GFM dual-mode	10 หรือ 11 จาก container 17
composite container dimension			$6 + 4 \times 17 = 74$

ตารางที่ 9: เหตุการณ์ตาม case และผลจาก accepted event log

เวลา	ประเภท	ความหมาย
20.000 s	SG trip	เปิด breaker, SG หยุดฉีดเข้าสู่ network
50.000 s	load step	เพิ่ม P, Q load ตาม case
85.000 s	fault on	fault ที่ bus 9
85.150 s	fault clear	คืน topology หลังช่วง fault
110.000 s	line trip	เปิดสาย 6–13
145.000 s	restore request	เริ่ม workflow คืน SG reference

เหตุการณ์ห้ารายการแรกเป็น **CASE_DEFINED**; เวลา reclose และเวลา release เป็น *PROJECT_RESULT* จาก event log ไม่ hard-code ใน solver หลัง SG trip อย่างน้อยหนึ่ง GFM ต้องทำหน้าที่ voltage-forming เพื่อ fix reference angle หากไม่มีจะ refuse ก่อนเรียก Newton

การ map ที่ต้องไม่สลับ ลำดับ resource ของ IBR คือ $[1, 2, 3, 4]$ และ bus ที่สอดคล้องคือ $[2, 3, 6, 8]$ ตัวสร้างรูปตรวจ mapping นี้ในทุก arm ก่อน export เพราะการ เรียง device ผิดจะทำให้เส้นของ converter หนึ่งถูกอ่านเป็นอีก converter โดย ไม่เปลี่ยนค่า numerical

Candidate selection และ switching contract

หลัง SG offline ตัวเลือก GFM เป็น subset ของ IBR สี่ตัวทั้งหมด จึงมี 15 candidates การประเมินแต่ละชุดแก้ equilibrium และ linearise ใหม่บน network เดียวกัน ไม่ reuse eigenvalue จากชุดอื่น

ตารางที่ 10: ผลการคัดเลือกจาก candidate table

จำนวน GFM	จำนวนที่ตรวจ	จำนวนพร้อมใช้	หลักฐานสำคัญ
1	4	4	ต้องมี source และผ่าน damping-ratio gate
2	6	2	best set อยู่ในกลุ่มนี้
3	4	0	ไม่มีชุดที่ผ่านใน snapshot
4	1	1	ผ่าน linear screen แต่ไม่พอรับประกัน TS
รวม	15	7	admissibility ไม่ monotone ตามจำนวน

best set ที่รายงานเป็น IBR3+IBR6 โดย $\Omega = -0.56814$ ขณะที่ best single มี $\Omega = -0.32801$ และ full set มี $\Omega = -0.48291$ ค่า Ω เป็น damping margin ของ equilibrium ของชุดนั้นเอง ไม่ใช่ margin ของ trajectory ที่กำลังสลับ

ความหมายของ [3 4] เมื่อ log เขียน candidate เป็น $[3\ 4]$ นั่นคือ resource indices ในลำดับ IBR ไม่ใช่ bus IDs ดังนั้น map ที่ใช้จริงคือ resource 3 $\longrightarrow$ bus 6 และ resource 4 $\longrightarrow$ bus 8 หรือ bus set $[6\ 8]$ การระบุสองแบบนี้พร้อมกัน ป้องกันความสับสนระหว่าง index ภายในกับ external ID

สัญญาการ commit candidate ต้องผ่าน equilibrium convergence, physical KCL, finite state, conditioning, damping-ratio threshold และ authenticated fingerprint ก่อน mode transaction ถ้าไม่ผ่านจะไม่แก้ด้วยการเลือก candidate ถัดไปแบบ เงียบ ๆ การ commit เป็น atomic: map controller, solve right-limit, ตรวจ continuity แล้วจึงเขียน accepted state

linear ไม่เท่ากับ nonlinear full four-GFM เป็นตัวอย่างที่ผ่าน linear screen แต่เมื่อ pin ตั้งแต่ SG trip กลับหยุดที่ 25.485 วินาที ขณะที่ adaptive ค่อย ๆ เพิ่ม support ผ่าน transition certificate จึงไปต่อได้ การคัดเลือกเป็น necessary condition ไม่ใช่ sufficient condition

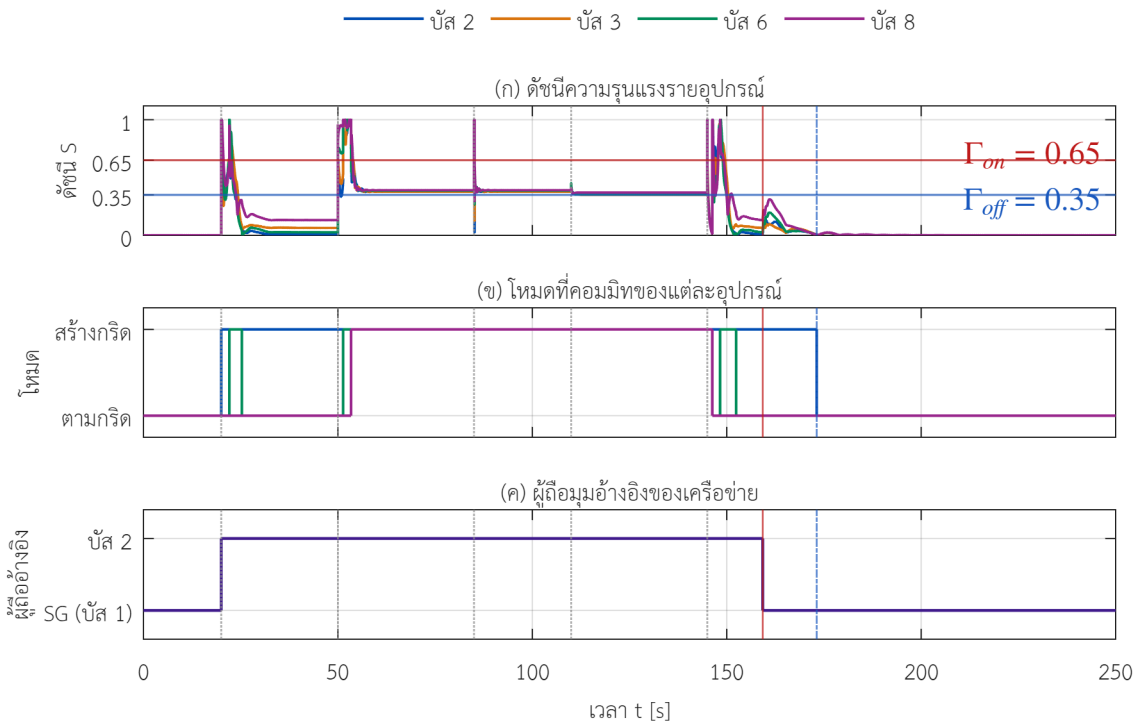
Chronology 250 วินาทีและผลของ supervisor

การทดลอง flagship ใช้ event schedule ที่ตรึงไว้ล่วงหน้าและให้ accepted state เป็นเจ้าของการตัดสินใจทุกครั้ง ตารางนี้แยก event ที่เป็น **CASE_DEFINED** ออกจากผลที่เป็น *PROJECT_RESULT*

ตารางที่ 11: ลำดับเหตุการณ์และผลของ adaptive arm

เวลา (s)	ชนิด	เหตุการณ์และผลที่ตรวจได้
20.000	CASE_DEFINED	SG bus 1 trip; เริ่ม islanding และต้องมี voltage-forming source
22.089, 51.340, 53.379	PROJECT_RESULT	augment ตามลำดับเพื่อเพิ่ม GFM support
25.303	PROJECT_RESULT	release แรกหลัง transition certificate ผ่าน
50.000	CASE_DEFINED	load เพิ่ม 20%
85.000–85.150	CASE_DEFINED	bus 9 fault แล้ว clear บน grid ที่ลงตรง event
110.000	CASE_DEFINED	line 6–13 trip
145.000	CASE_DEFINED	restore request; right-limit solve ก่อน commit
146.278, 148.281, 152.402	PROJECT_RESULT	release/augment/release ในช่วง restore
159.252	PROJECT_RESULT	reclose สำเร็จตาม summary; mode transaction ยังถูกตรวจต่อ
173.1271	PROJECT_RESULT	mode return หลัง handback และ reselection guard
250.000	PROJECT_RESULT	horizon สิ้นสุดด้วย terminal frequency 60.000001 Hz

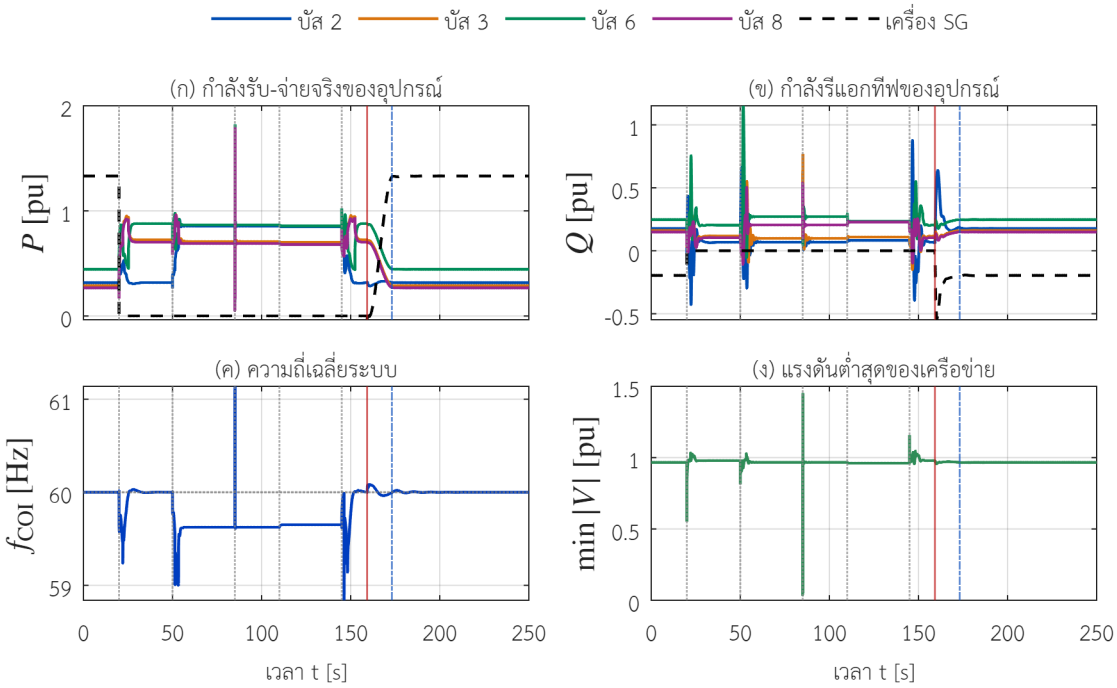
ลำดับบน timeline คือ SG trip 20.000 s, load step 50.000 s, fault 85.000–85.150 s, line trip 110.000 s และ restore request 145.000 s ก่อน reclose 159.252 s และ mode return 173.1271 s ตาม summary



รูปที่ 4: severity, mode และ owner จาก raw adaptive trajectory; สีเป็นเพียงการจัดหมวด

ผลตอบสนองไฟฟ้าจาก raw adaptive trajectory

รูปนี้อ่านจาก trajectory ที่เก็บจริงโดยไม่เติม noise, smoothing, filtering หรือ การ extrapolate แขนที่หยุดก่อน horizon เส้น event เป็น marker ของเวลาใน schedule ไม่ใช่การปรับ trajectory ให้เรียบ



รูปที่ 5: กำลัง active/reactive, ความถี่ COI และแรงดันต่ำสุดของ bus ที่ติดตาม

ตารางที่ 12: ค่าสูงสุด/ต่ำสุดและค่าปลายทางจาก adaptive arm

ตัวชี้วัด	ค่า	ความหมาย
V_{min} ทั้ง trajectory	0.036855 pu	peak metric
V_{max} ทั้ง trajectory	1.523199 pu	peak metric
f_{min} ทั้ง trajectory	58.839081 Hz	peak metric
f_{max} ทั้ง trajectory	61.138547 Hz	peak metric
V_{min}, V_{max} ที่ปลายทาง	0.9667 pu, 1.0575 pu	settled metric
f ที่ปลายทาง	60.000001 Hz	settled metric

ช่วง peak สะท้อน disturbance ทั้งหมด ขณะที่ settled metrics อ่านเฉพาะ accepted sample สุดท้าย จึงไม่ควรนำสองกลุ่มนี้ไปปะปนกัน ค่า residual ของ run คือ 9.9721×10^{-9} และไม่มี subdivision เพิ่มใน summary

ตาราง six-arm และการเปรียบเทียบนโยบาย

แขนทั้งหกอ่านจาก cache ชุดเดียวและผ่าน hash check ก่อนสร้างตาราง จึงแยก **PROJECT_RESULT** ของแต่ละ policy ออกจากสมมติฐานของตัว solver ได้ ชัดเจน แขนที่หยุดก่อน 250 วินาทีไม่ถูก extrapolate ให้ครบ horizon

ตารางที่ 13: ผลการรันหกแขนจาก snapshot เดียว

แขน	horizon (s)	สถานะ	reclose (s)	GFM สูงสุด	samples	หมายเหตุ
adaptive	250.000	สำเร็จ	159.2519	4	3679	adaptive policy
pinned 1 GFM	250.000	สำเร็จ	151.1321	1	1766	pin หนึ่งตัว
pinned 2 GFM	250.000	สำเร็จ	154.0244	2	1761	pin สองตัว
pinned 4 GFM	25.485	หยุดก่อน horizon	–	4	837	minimum-step failure
locked GFL	20.000	หยุดเมื่อ source หาย	–	0	43	ไม่มี voltage-forming source
no adaptation	250.000	สำเร็จ	151.1321	1	1565	ไม่มี adaptive stepper

Peak กับ settled สำหรับ adaptive arm peak voltage range คือ $[0.036855, 1.523199]$ pu และ peak frequency range คือ $[58.839081, 61.138547]$ Hz ตลอด trajectory ค่าปลายทางคือ voltage range $[0.9667, 1.0575]$ pu และ frequency 60.000001 Hz การรายงานสอง envelope แยกกันป้องกัน การตีความว่า transient peak เป็น operating point สุดท้าย

รูปที่ 6: ความถี่ COI ของแต่ละ policy บนช่วงที่มีข้อมูลจริง; สีแยก policy เท่านั้น

ช่วง common window คือ $[0, 20.000)$ วินาที และ 1 หมายถึงทุกแขนที่มีข้อมูลในช่วงนี้ bit-identical กับ reference; pairwise check แต่ละแขนใช้ 42 ตัวอย่าง ไม่มีการยืดช่วงของแขนที่ล้มเหลว

ข้อจำกัด ความพร้อม ข้อสรุป และเอกสารอ้างอิง

ข้อจำกัดของข้ออ้าง ผลนี้เป็น numerical evidence ของ PF–SSSA–TS และการสลับ mode ใน balanced RMS model ไม่ใช่การรับรอง EMT, unbalanced protection, hardware controller, grid-code compliance หรือการใช้งานภาคสนาม ค่าความต่างกับ Padiyar สูงสุดราว 4.3×10^{-2} เป็น diagnostic ที่ยังไม่ทราบสาเหตุและไม่ใช่ gate ส่วน PGAz มี execution artifact แต่ comparison gate ไม่ผ่าน จึงไม่ถูกใช้เป็นหลักฐาน primary

ความพร้อมของ implementation production ใช้สมการและ state order ภายในโครงการ รวมถึง implicit trapezoidal TS และ Schur solve ด้วย backslash; external programs เป็น oracle เท่านั้น การเปลี่ยน mode ต้องผ่าน finite-state, KCL, conditioning, continuity และ authenticated provenance gate การไม่มี voltage-forming source หรือ Newton right-limit ที่ไม่ผ่านจะหยุดแบบ fail-closed

สิ่งที่ยังไม่อ้าง ตัวนับ rejected trial ใน search path ถูกตัดออกจากรายงานเพราะ defect record ยังเปิดอยู่ จึงไม่ใช้ตัวเลขนั้นสนับสนุน readiness หรือ performance ใด ๆ นอกจากนี้ผล six-arm เป็น snapshot ที่ commit `c56ff9f` และรูป/ตาราง สร้างด้วย generator ที่ตรวจ hash; หาก cache เปลี่ยนต้องสร้างรายงานใหม่ทั้งชุด

ข้อสรุป สายงานที่เชื่อม PF, equilibrium, SSSA, TS และ supervisor ด้วย residual กับ state mapping เดียวกันสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ ผล IEEE-14 แสดงว่า adaptive arm เดินครบ 250.000 วินาที, reclose สำเร็จที่ 159.252 วินาที และ กลับ mode ที่ 173.1271 วินาที ขณะที่ pinned และ locked arms แสดงขอบเขต failure อย่างซื่อสัตย์ ตาราง six-arm จึงใช้บอก trade-off ของ policy ไม่ได้ใช้เป็นคำรับรองความมั่นคงเชิงปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิงใน repository

1. โครงการ, *Project contracts and numerical integrity*, `AGENTS.md`, revision ที่ใช้กับรายงานนี้
2. โครงการ, *IBR reduced-6 EECON49 manifest*, `docs/project/IBR_REDUCED6_EECON49_MANIFEST.md`
3. โครงการ, *SSSA validation artifact*, `output/validation/artifacts/sssa_validation.md`
4. โครงการ, *IEEE-14 three-way TS comparison*, `docs/source/figures/case14_ts/case14_ts_compare_three_way.md`
5. โครงการ, *SMIB GFL-RMS10 and GFM-no-PLL diagnostics*, `output/diagnostics/smib/`
6. โครงการ, *PF, SSSA, TS and IBR source implementations*, `+pfsolver/`, `+stability/`, `+ibr/`

รายงานฉบับนี้แสดงตัวเลขจาก artifact ที่ตรวจ provenance ได้ แยก CASE_DEFINED, PROJECT_RESULT และ ASSUMED_DIAGNOSTIC และไม่อ้างค่าที่ ยังอยู่ใน defect state เปิด