การสลับโหมดอ้างอิง GFL/GFM อัตโนมัติ ในระบบ IEEE-14 ที่มี SG หนึ่งเครื่องและ IBR สี่ตัว

แบบจำลอง สเปกตรัมสัญญาณขนาดเล็ก สูตรโดเมนเวลาแบบสลับโหมด และการเปรียบเทียบนโยบายควบคุมห้าแบบบนวิถีเดียวกัน

(ฉบับภาษาไทย ผลชุด 250.000 วินาที อธิบายละเอียดเพื่อการนำเสนอ)

Power-flow / stability toolchain — generated report

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้อธิบายการทดลองบนเครือข่าย IEEE-14 ที่ถูกดัดแปลง โดยมีเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous generator, SG) หนึ่งเครื่องที่บัสอ้างอิง และแหล่งจ่าย ผ่านอินเวอร์เตอร์ (inverter-based resource, IBR) สี่ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 ระบบถูกขับผ่านลำดับเหตุการณ์หกช่วงต่อเนื่องกัน คือ SG ถูกตัดออกจากระบบ โหลดถูก เพิ่มแบบขั้น เกิดฟอลต์แบบชันต์และถูกเคลียร์ สายเชื่อมถูกเปิดวงจร และท้ายที่สุด SG ถูกต่อกลับ (reclose) แก่นของงานคือ IBR ทั้งสี่ตัว*สลับพฤติกรรมอ้างอิงเอง โดยอัตโนมัติ*ระหว่างโหมดตามกริด (grid-following, GFL) และโหมดสร้างกริด (grid-forming, GFM) ภายใต้ดัชนีความรุนแรง (severity index) ที่สร้างจากการเบี่ยงเบน ของแรงดันและความถี่ ร่วมกับฮิสเทอรีซิสและเวลาหน่วงคงสถานะ (dwell)

รายงานถอดเนื้อหาทั้งหมดจากโค้ดที่ใช้งานจริง ประกอบด้วย (i) ดัชนีความรุนแรงและ ดัชนีย่อยสองตัว J_V, J_f; (ii) แบบจำลอง SG อันดับหก พร้อมการอนุมานทีละอันดับและ ลิมิตเอกฐาน (singular limit) ที่ทำให้สเตตฟลักซ์หนึ่งตัวถูกตรึง; (iii) แบบจำลอง IBR สองโหมด ขนาด 17 สเตต พร้อมชุดสเตตที่แอ็กทีฟจริงในแต่ละโหมด และการถ่ายโอนโหมดที่มี เกตความต่อเนื่องของกระแสกำกับ; (iv) สูตรโดเมนเวลาแบบสลับโหมดด้วยกฎสี่เหลี่ยม คางหมูแบบอิมพลิซิต รวมถึงกลไกที่แทนการอินทิเกรตสเตตด้วยการกำหนดค่าโดยตรงเมื่อ เปลี่ยนโหมด; และ (v) ผลการไหลของกำลัง สเปกตรัมสัญญาณขนาดเล็ก และผลตอบสนอง ชั่วครู่ที่ตัวแก้ยอมรับ

ทุกสมการคือสมการที่การรัน 250 วินาทีเรียกใช้จริง และทุกเส้นกราฟคือค่าดิบที่ตัวแก้ ยอมรับจากวิถี (trajectory) 250 วินาทีเดียวกันนั้น รายงานนี้**ไม่**อ้างความ พร้อมใช้งานเชิงปฏิบัติการ การที่การจำลองลู่เข้าไม่ใช่หลักฐานของการผ่านเกณฑ์ กริดโค้ด

วิธีอ่านรายงานฉบับนี้ เนื้อหาเรียงจาก “อะไรถูกตัดสินใจ” ไปสู่ “ตัดสินใจด้วยสมการอะไร” และปิดท้ายด้วย “ผลที่ได้คืออะไร” ผู้อ่านที่ต้องการเห็นภาพรวมก่อนสามารถอ่านหัวข้อ 1 (ขอบเขตและที่มา), 2 (ลำดับเหตุการณ์) และ 9 (ผลชั่วครู่) แล้วจึงย้อนกลับมาอ่านหัวข้อ 4–6 ซึ่งเป็นส่วนสมการโดยละเอียด ทุกหัวข้อสมการจะมีย่อหน้า *“อ่านสมการนี้อย่างไร”* กำกับไว้ เพื่อให้เห็นว่าแต่ละพจน์มีความหมายเชิง กายภาพอย่างไร และเหตุใดจึงต้องมีพจน์นั้น

สารบัญ

1 ขอบเขต ที่มาของข้อมูล และการทำซ้ำ **3**
1.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ตลอดรายงาน . . . 4

2 ลำดับเหตุการณ์รบกวน **5**

3 การเลือกโหมด GFL/GFM อัตโนมัติ: ดัชนีความรุนแรง **6**
3.1 หลักฐานการตัดสินใจ: ดัชนีทุกตัวบนแกนเวลาเดียวกัน . . . 7

4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส: แบบจำลองอันดับหกและการพิสูจน์ **11**
4.1 การอนุมานทีละอันดับ . . . 11
4.2 อินเทอร์เฟซพีชคณิตของสเตเตอร์ . . . 12
4.3 ลิมิตเอกฐานที่ตรึงสเตต E'_d . . . 12
4.4 การไหลตามแรงเฉื่อยเมื่อเบรกเกอร์เปิด . . . 12

5 อินเวอร์เตอร์: แบบจำลองสองโหมดขนาด 17 สเตต 12
5.1 สเตตความหน่วงคำสั่งที่ถูกลดออก . . . 13
5.2 ภาคกำลังร่วม (สเตต 1–3) . . . 14
5.3 GFL (สเตต 4–9): แหล่งกระแสที่มี PLL . . . 15
5.4 GFM (สเตต 10–16): แหล่งแรงดัน มีสมการแกว่งเสมือน ไม่มี PLL . . . 15
5.5 การถ่ายโอนโหมดที่มีเกตความต่อเนื่องของกระแสกำกับ . . . 16

6 สูตรโดเมนเวลาแบบสลับโหมด 16
6.1 เหตุใดสมการเชิงอนุพันธ์ของแต่ละอุปกรณ์จึงไม่เหมือนกัน . . . 17
6.2 หนึ่งระบบ DAE ประกบกัน หนึ่งขั้นสี่เหลี่ยมคางหมูแบบอิมพลิซิต . . . 17
6.3 ขั้นเวลาถูกแก้อย่างไร: ระบบนิวตันแบบมีการหน่วง . . . 17
6.4 พิกัดที่ถูกตรึง: การฉายด้วย Π . . . 18
6.5 การสลับโหมด: จากการอินทิเกรตเป็นการกำหนดค่า . . . 18
6.6 มิติของสเตตที่ถูกอินทิเกรตจริง และเรซิดวลรายขั้น . . . 18

7 ผลการไหลของกำลัง 19

8 สเปกตรัมสัญญาณขนาดเล็ก 20

9 ผลตอบสนองชั่วครู่: การจำลองในโดเมนเวลา 23

1 ขอบเขต ที่มาของข้อมูล และการทำซ้ำ

ระบบที่ศึกษาคือเครือข่าย IEEE-14 บัส โดยมี SG ที่ถูกจำลองไว้หนึ่งเครื่องที่บัส อ้างอิง และ IBR ที่ถูกจำลองไว้สี่ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 ทั้งระบบถูกประกอบเป็น ระบบสมการเชิงอนุพันธ์–พีชคณิต (differential–algebraic system, DAE) *ชุด เดียว* ที่บังคับกฎกระแสของ Kirchhoff (KCL) ที่ทุกบัส

$$g(x, V) \;=\; Y_{\text{net}} V \;-\; I_{\text{bus}}(x, V) \;=\; 0, \tag{1}$$

โดย Y_{net} คือแอดมิตแตนซ์ของเครือข่าย V คือเวกเตอร์แรงดันบัสเชิงซ้อน ที่เรียงต่อกัน และ I_{bus} คือกระแสรวมที่อุปกรณ์ทุกตัวอัดเข้าเครือข่าย

อ่านสมการนี้อย่างไร สมการ (1) คือข้อบังคับว่า ณ ทุกบัสและทุกขั้น เวลา กระแสที่ไหลออกทางสายส่ง ($Y_{\text{net}} V$) ต้องเท่ากับกระแสที่อุปกรณ์อัด เข้ามา (I_{bus}) พอดี ไม่มีการยุบบัสใดทิ้ง ไม่มีการแทนอุปกรณ์ด้วยแหล่ง จ่ายอุดมคติ และไม่มีการแยกแก้ทีละอุปกรณ์ SG และ IBR ทุกตัวส่งบล็อกสเตตเชิงอนุพันธ์ x ของตนเอง พร้อมกระแสอัดของตนเองเข้าสู่สมการนี้ ไม่มีอุปกรณ์ใดถูกส่งต่อให้ตัวแก้ แบบจำลอง หรือโปรแกรมอ้างอิงภายนอก ไลบรารีเชิงตัวเลขที่ใช้จำกัดอยู่เพียงพรีมิทิฟ เชิงเส้นที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว (`\`, `lu`, `qr`, `eig`)

ที่มาของสมการ ทุกสมการแบบจำลองในหัวข้อ 3–6 ถูกถอดมาตรงตัวจากโค้ดที่ใช้ งานจริงซึ่งตัวขับลำดับเหตุการณ์เรียกใช้ ตัวขับ ตารางเหตุการณ์ และเกนของตัวกำกับ (supervisor) ถูกกำหนดโดย

```
s = cases.scenario_ieee14_1sg_4ibr(struct('case_profile',
'eecon49_figure4'));
run_ieee14_gfl_gfm_state_release  % t_end=250, dt=0.1
```

ชื่อโปรไฟล์ของกรณีศึกษาข้างต้นเป็นตัวระบุในโค้ด (code identifier) และปรากฏเฉพาะ ในคำสั่งทำซ้ำนี้เท่านั้น

ที่มาของรูป และสัญญาว่าไม่มีสัญญาณสังเคราะห์ รูปผลชั่วครู่ในหัวข้อ 9 วาดจากวิถีที่ตัวแก้ยอมรับและถูกเก็บ รักษาไว้ที่ `output/diagnostics/ieee14_gfm_lock_compare_dcreal/adaptive_250s.mat` ซึ่งเป็นแขนสลับอัตโนมัติของการรัน 250 วินาที และเป็น วิถีเดียวกับที่รายงานฉบับภาษาอังกฤษใช้ ทุกจุดที่พล็อตเป็นค่าดิบที่ตัวแก้ยอมรับ ไม่มีการทำให้เรียบ (smooth) กรอง (filter) ลดจำนวนจุด (decimate) ตัดยอด (clip) เลื่อนระดับ (offset) แทรกค่า (interpolate) หรือเติมสัญญาณรบกวนสังเคราะห์ใด ๆ ตัวสร้างรูปบันทึกลง provenance ว่า `presentation_noise=struct('kind','none','seed_base',NaN,'affects_solver_or_switching',false)` หากมีการกำหนดหน้าต่างแสดงผล จะเป็นการจำกัดช่วงแกนนอนเท่านั้น — ไม่มีจุดใดในหน้า ต่างนั้นถูกแก้ค่าหรือถูกตัดออก

การจำแนกชั้นของการตัดสินใจ สมการ AC/ฟลักซ์ของ SG และสมการ AC/ตัวควบคุมของ IBR เป็น SOURCE_MAPPED (ถอดจากแหล่งอ้างอิงที่ระบุไว้ในโค้ด) ส่วน เวกเตอร์สเตตรวม 16 ตัวของ IBR แผนที่ถ่ายโอน GFL↔GFM และการปิด สมการของแหล่งจ่าย DC เป็น PROJECT_DERIVED (โครงการอนุมาน ขึ้นเองและประกาศไว้) พารามิเตอร์ของเครื่องและคอนเวอร์เตอร์ ฐานต่อหน่วย และเวลาเหตุการณ์เป็น CASE_DEFINED (มาจากกรณีศึกษา) ส่วนตัวทำนาย (predictor) และนโยบายการแบ่งขั้นเวลาย่อยเป็น NUMERICAL_METHOD ป้ายเหล่านี้สืบทอดมาจากฟิลด์ provenance ของโค้ด ไม่ได้ตัดสินใหม่ในรายงานนี้ ความสำคัญของการแยกชั้นคือ ข้ออ้างเชิงกายภาพ ต้องพิงชั้น SOURCE หรือ CASE เท่านั้น สมมติฐานเชิงวินิจฉัยไม่ สามารถใช้สนับสนุนข้อสรุปเรื่องความพร้อมใช้งานได้

1.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ตลอดรายงาน

ตารางที่ 1 รวบรวมสัญลักษณ์หลักไว้ที่เดียว เพื่อให้ผู้ฟังการนำเสนอ ย้อนกลับมาดูได้เร็วโดยไม่ต้องค้นทั้งเล่ม สัญลักษณ์ทั้งหมดตรงกับชื่อในโค้ดที่ใช้งาน จริง เพียงแต่เขียนในรูปตัวห้อยทางคณิตศาสตร์ตามข้อกำหนดการนำเสนอของโครงการ

ตารางที่ 1: สัญลักษณ์หลักและความหมาย

สัญลักษณ์	ความหมาย
ระดับระบบ	
Y_{net}, V	แอดมิตแตนซ์เครือข่าย และเวกเตอร์แรงดันบัสเชิงซ้อน
$I_{\text{bus}}(x, V)$	กระแสรวมที่อุปกรณ์ทุกตัวอัดเข้าบัส
$x, \mathcal{A}, \mathcal{F}$	เวกเตอร์สเตตรวม, ชุดดัชนีที่แอ็กทีฟ, ชุดดัชนีที่ถูกตรึง
$n_x(t)$	จำนวนสเตตเชิงอนุพันธ์ที่ถูกอินทิเกรตจริง ณ เวลา t
$h, r(z), J$	ขั้นเวลา, เรซิดวลของขั้นนั้น, จาโคเบียนของเรซิดวล
$S_{\text{base}}, f_0, \omega_b$	ฐานกำลังระบบ, ความถี่ฐาน 60 Hz, $\omega_b = 2\pi f_b$
κ	อัตราส่วนฐาน $S_{\text{base}}/M_{\text{base}}$ ระหว่างฐานระบบกับฐานอุปกรณ์
ตัวกำกับการสลับโหมด	
J_V, J_f	ดัชนีย่อยการเบี่ยงเบนแรงดัน และการเบี่ยงเบนความถี่
$S(t)$	ดัชนีความรุนแรงรวม, $S \in [0, 1]$
$\Gamma_{\text{on}}, \Gamma_{\text{off}}$	ระดับกระตุ้นเข้าสู่ GFM และระดับปลดกลับสู่ GFL
$T_{d,\text{on}}, T_{d,\text{off}}$	เวลาหน่วงคงสถานะขาเข้า และขาออก
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (SG)	
δ, ω	มุมโรเตอร์ และความเบี่ยงเบนความเร็วต่อหน่วย (สลิป)
E'_q, E'_d	แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ (transient EMF) แกน q และ d
E''_q, E''_d	แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ย่อย (subtransient EMF) แกน q และ d
T_m, E_{fd}	ทอร์กทางกล และแรงดันกระตุ้นสนาม
T_e, I_d, I_q	ทอร์กไฟฟ้าช่องอากาศ และกระแสสเตเตอร์ในกรอบ dq ของเครื่อง
H, D, R_a	ค่าคงที่ความเฉื่อย, สัมประสิทธิ์หน่วง, ความต้านทานอาร์เมเจอร์
อินเวอร์เตอร์ (IBR)	
i_d, i_q, V_{dc}	กระแสตัวกรองแกน d, q และแรงดันบัส DC (ใช้ร่วมทั้งสองโหมด)
$\delta_{\text{PLL}}, \xi_{\text{PLL}}$	มุม PLL และตัวอินทิเกรตของ PLL (มีเฉพาะ GFL)
ξ_P, ξ_Q	ตัวอินทิเกรตวงรอบกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ (GFL)
$\delta_{\text{VSG}}, \omega_{\text{VSG}}$	มุมและความถี่ของเครื่องซิงโครนัสเสมือน (GFM)
E	สเตตแอมพลิจูดแรงดันของวงรอบ Q–V (GFM)
ξ_{Vd}, ξ_{Vq}	ตัวอินทิเกรตวงรอบแรงดันแกน d, q (GFM)
ξ_{Id}, ξ_{Iq}	ตัวอินทิเกรตวงรอบกระแสชั้นใน (มีทั้งสองโหมด)
E_{dc}, R_{dc}	แรงเคลื่อนไฟฟ้าและความต้านทานภายในของแหล่งจ่าย DC
$R_{ch}, V_{dc}^{\max}$	ความต้านทานและขีดเริ่มนำกระแสของชอปเปอร์กันแรงดันเกิน
$\Pi_I(\cdot; I_{\max})$	ตัวจำกัดกระแสแบบวงกลม
$\mathcal{H}(\cdot)$	ตัวอินทิเกรตแบบมีเงื่อนไขกันการอิ่มตัวสะสม (anti-windup)

2 ลำดับเหตุการณ์รบกวน

เวลาของเหตุการณ์ที่ตั้งไว้ล่วงหน้าเป็นค่าคงที่ CASE_DEFINED ในโครงสร้าง เหตุการณ์ ส่วนเวลาที่ SG ต่อกลับ (reclose) และเวลาที่ความรุนแรงคลายลงจนปลดโหมดได้ เป็น*ผลลัพธ์*ที่อ่านจากบันทึกเหตุการณ์ที่ตัวแก้ยอมรับ ฟอลต์แบบชันต์เกิดที่ $t = 85.000$ s และถูกเคลียร์ที่ $t = 85.150$ s (เป็นฟอลต์ที่บัส 9 นาน 0.150 s อิมพีแดนซ์ฟอลต์ $Z_f = 0.01 + \mathrm{j}0.01$ p.u.) ค่าหน้าต่างนี้อ่านจากตัวขับโดยตรงและมีศักดิ์เหนือช่วงฟอลต์กว้าง ๆ ที่อาจระบุไว้ในเอกสารรุ่นก่อน

แผนภาพช่วงการทำงานทั้งหกและเวลาที่เปลี่ยนช่วงคือรูปที่ 5 ซึ่งใน ฉบับนี้ถูกย้ายไปวางไว้*เหนือกราฟผลลัพธ์*ในหัวข้อ 9 โดยเจตนา เพื่อให้เทียบไทม์ไลน์กับเส้นกราฟได้ในสายตาเดียวโดยไม่ต้องพลิกหน้ากลับ

ตารางที่ 2 ขยายรูปที่ 5 ให้เห็นว่าแต่ละช่วงกระทบ อะไรกับอุปกรณ์ ประโยชน์ของการอ่านตารางนี้ก่อนดูกราฟคือ เมื่อเห็นเส้นกราฟกระโดดจะทราบทันทีว่าเป็นผลจากเหตุการณ์ใด ไม่ใช่ความผิดปกติเชิงตัวเลข

ตารางที่ 2: สรุปช่วงการทำงานหกช่วง และผลกระทบต่ออุปกรณ์

ช่วง	หน้าต่างเวลา	เหตุการณ์	ผลต่ออุปกรณ์และการอ้างอิง
1	0–20 s	ทำงานปกติ	SG ออนไลน์และเป็นเจ้าของมุมอ้างอิงของเกาะไฟฟ้า IBR ทั้งสี่อยู่ในโหมด GFL
2	20–50 s	ตัด SG_1 ออก (สูญเสีย slack)	เกตกันการสูญเสียแหล่งอ้างอิงยก IBR ที่ออนไลน์ทุกตัวขึ้นเป็น GFM ทันที ตัว SG ยัง อยู่ในเวกเตอร์สเตตและไหลตามแรงเฉื่อยต่อ (coast)
3	50–85 s	โหลด P, Q เพิ่มขึ้น 20%	ภาระของ IBR ที่เป็น GFM เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันและความถี่เบี่ยงเบนมากขึ้น จึงดัน ค่า J_V, J_f ให้สูงขึ้น
4	85.000–85.150 s	ฟอลต์ชันต์ที่บัส 9 แล้วเคลียร์	ช่วงที่ความรุนแรงสูงสุดของทั้งการรัน แรงดันยุบและกระแสอ้างอิงชนวงกลมจำกัดกระแส
5	110–145 s	เปิดวงจรสาย 6–13	โครงสร้างเครือข่ายเปลี่ยน อิมพีแดนซ์ที่ IBR มองเห็นเปลี่ยนตาม
6	145 s–250.000 s	อนุญาตให้ต่อ SG_1 กลับ	การซิงโครไนซ์เริ่มได้ตั้งแต่ 145 s ผลจริงต่อกลับที่ 159.252 s หลังจากนั้นความรุนแรงลดลงจนปลดโหมดครั้งแรกได้ที่ 25.303 s และ SG กลับมาเป็นเจ้าของมุมอ้างอิง

3 การเลือกโหมด GFL/GFM อัตโนมัติ: ดัชนีความรุนแรง

IBR แต่ละตัวมีตัวกำกับสองสถานะที่ตัดสินว่าอุปกรณ์ควรทำตัวเป็น*แหล่งกระแส*ที่ เดินตามกริด (GFL) หรือเป็น*แหล่งแรงดัน*ที่สร้างกริด (GFM) การตัดสินขับด้วย ค่าสเกลาร์ความรุนแรง $S(t) \in [0,1]$ ซึ่งประกอบจากดัชนีย่อยที่ถูกทำให้เป็นค่ามาตรฐาน สองตัว คือดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดัน J_V และดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่ J_f

ดัชนีย่อยสองตัว ให้ $|V_i(t)|$ เป็นขนาดแรงดันที่ขั้วของ IBR ตัวที่ i และ $V_i^\star$ เป็นขนาด แรงดัน*รายบัส*จากผลการไหลของกำลังที่จุดทำงานตอน SG ออนไลน์ (หัวข้อ 7) ให้ $f_{\text{coi}}(t)$ เป็นความถี่จุดศูนย์กลางความเฉื่อย (centre of inertia) ด้วยฐาน $\Delta V_{\text{base}} = 0.10$ p.u. และ $\Delta f_{\text{base}} = 0.50$ Hz

$$J_V(t) = \frac{\big|\,|V_i(t)| - V_i^\star\,\big|}{\Delta V_{\text{base}}}, \qquad J_f(t) = \frac{\big|\,f_{\text{coi}}(t) - f_0\,\big|}{\Delta f_{\text{base}}}, \qquad f_0 = 60 \text{ Hz}. \tag{2}$$

อ่านสมการนี้อย่างไร ทั้งสองดัชนีเป็นอัตราส่วนไร้หน่วย “เบี่ยงเบนไปกี่เท่า ของงบที่ยอมรับได้” ตัวหารจึงทำหน้าที่แปลงหน่วยจริง (pu และ Hz) ให้เทียบกันได้ ก่อนนำมาเฉลี่ย จุดที่ต้องเน้นคือ $V_i^\star$ เป็นค่าแรงดันของบัสนั้น *ตาม ผลการไหลของกำลังจริง* ไม่ใช่ 1.0 p.u. แบบเหมารวมทุกบัส เพราะบัส 6 และบัส 8 มีแรงดัน ปกติสูงกว่า 1 p.u. อยู่แล้ว (ตารางที่ 4) หากใช้ 1.0 p.u. เป็นค่าอ้างอิง ดัชนีจะรายงานความรุนแรงค้างไว้ตลอดเวลาแม้ระบบยังปกติ ในเชิงบทบาท J_V จับเหตุการณ์ *เฉพาะที่* เช่นแรงดันยุบตอนฟอลต์ ส่วน J_f จับเหตุการณ์*ทั้งระบบ* เช่น ความถี่เหวี่ยงหลังสูญเสีย SG ที่ทำหน้าที่ slack ที่ $t = 20$ s

f_{coi} ต่างจากความถี่รายอุปกรณ์ f_k อย่างไร ความถี่สองแบบนี้ต่างกันที่*ขอบเขต* ความถี่รายอุปกรณ์ f_k คือค่าของอุปกรณ์ ตัวเดียว ซึ่งคำนวณจากสเตตความเร็วของตัวมันเอง: SG ใช้ความเร็วโรเตอร์จริง $f_k = f_0(1+\omega)$ ส่วน IBR ที่อยู่ในโหมด GFM ใช้ความถี่ของเครื่องซิงโครนัสเสมือน $f_k = f_0(1+\omega_{\text{VSG}})$ ขณะที่ IBR ที่อยู่ในโหมด GFL *ไม่มี*ความถี่ ของตนเองเลย เพราะมันล็อกตามกริดผ่าน PLL ค่า f_k นี้คือสิ่งที่พล็อตไว้ในแผง (e) ของ รูปที่ 7 (หลายเส้น เส้นละอุปกรณ์) ส่วน f_{coi} เป็นค่า *ตัวเดียวของทั้งเกาะไฟฟ้า* ณ แต่ละเวลา นิยามเป็นค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วย ความเฉื่อย

$$f_{\text{coi}}(t) = \frac{\sum_{k\in\mathcal{O}} H_k\, f_k(t)}{\sum_{k\in\mathcal{O}} H_k}, \tag{3}$$

โดย $\mathcal{O}$ คือเซตของอุปกรณ์ที่*ออนไลน์และมีโรเตอร์* (โรเตอร์จริงของ SG หรือโรเตอร์เสมือนของ GFM) และ H_k คือค่าคงที่ความเฉื่อยของอุปกรณ์นั้นบนฐานระบบ (สำหรับ GFM คือความเฉื่อยเสมือนที่แมปมาบนฐานเดียวกัน) อุปกรณ์ที่เป็น GFL และอุปกรณ์ ที่ออฟไลน์ไม่เข้าสมการนี้

ผลของนิยาม (3) ในงานนี้ตรงไปตรงมา: *ก่อน* $t = 20$ s ซึ่ง IBR ทั้งสี่ ยังเป็น GFL ไม่มี IBR ตัวใดเข้าสมการเลย ผู้ร่วมมีเพียง SG ตัวเดียว ดังนั้น f_{coi} เท่ากับความถี่ของ SG พอดี และ*หลัง* $t = 20$ s เมื่อ SG หลุด ออกไปจนถูกตัดออกจากการเฉลี่ย f_{coi} กลายเป็นค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก H ของ IBR สี่ตัวที่เป็น GFM ข้อสังเกตนี้อธิบายได้ว่าเหตุใดความถี่ที่ใช้ตัดสินจึงไม่ กระโดดเป็นค่าไร้ความหมายตอน SG หลุด แม้ “เจ้าของ” ความถี่จะเปลี่ยนมือ

เหตุใดต้องใช้ COI ไม่ใช้ f_k ของอุปกรณ์ใดตัวหนึ่ง มีสามเหตุผล หนึ่ง ดัชนี J_f ต้องวัดว่า*ทั้งระบบ*เบี่ยงเบนไปเท่าไร ถ้าเลือก f_k ของอุปกรณ์เดียว คำตอบจะขึ้นกับว่าเลือกอุปกรณ์ตัวไหน ซึ่งไม่ใช่คุณสมบัติของระบบ สอง การแกว่งระหว่าง เครื่อง (inter-machine swing) หักล้างกันเองในการเฉลี่ยแบบ COI เหลือเพียงการเลื่อน ร่วม (common-mode drift) ซึ่งคือสิ่งที่ต้องการวัดจริง มิฉะนั้นตัวกำกับจะไปตอบสนอง ต่อการแกว่งภายในระหว่างอุปกรณ์ สาม การถ่วงน้ำหนักต้องใช้ H_k ไม่ใช่ค่าเฉลี่ย เลขคณิต เพราะอุปกรณ์ที่มีความเฉื่อยมากลากความถี่ของระบบได้มากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ย เลขคณิตเมื่อค่า H ไม่เท่ากันถือเป็นความผิดพลาดเชิงนิยาม และมีชุดทดสอบของโครงการ คุมเงื่อนไขนี้ไว้โดยเฉพาะ

ความไม่สมมาตรที่ควรสังเกตในสมการ (2) J_V ใช้ค่า*เฉพาะที่* คือ $|V_i|$ ของบัสตัวเอง ดังนั้น IBR แต่ละตัวได้ค่า J_V ต่างกัน แต่ J_f ใช้ค่า*ร่วมของทั้งระบบ* คือ f_{coi} เพียงค่าเดียว ดังนั้น IBR ทั้งสี่ตัวได้ ค่า J_f เท่ากันที่เวลาเดียวกัน ความไม่สมมาตรนี้ตั้งใจให้ตรงกับกายภาพ: แรงดันเป็นปริมาณเฉพาะที่ที่ต่างกันไปตามบัส ส่วนความถี่ในเกาะไฟฟ้าที่ยังซิงโครไนซ์กันเป็น ปริมาณร่วมของทั้งเกาะ ผลเชิงพฤติกรรมคือ พจน์ J_f ผลัก IBR ทุกตัวไปในทิศเดียวกัน พร้อมกัน ขณะที่พจน์ J_V เป็นตัวแยกแยะว่าอุปกรณ์ตัวใดอยู่ใกล้จุดที่มีปัญหาที่สุด

ดัชนีรวมสองพจน์ ความรุนแรงคือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักเท่ากันที่ถูกจำกัดช่วง

$$S(t) = \text{sat}_{[0,1]}\Big(\tfrac{1}{2}J_V(t) + \tfrac{1}{2}J_f(t)\Big), \qquad \text{sat}_{[0,1]}(z) = \min\{1, \max\{0, z\}\}. \tag{4}$$

การถ่วงน้ำหนักเท่ากันเป็นการเลือกแบบ PROJECT_DERIVED และถูกตรึงไว้ก่อน อ่านผลใด ๆ การจำกัดช่วงด้วย $\text{sat}_{[0,1]}$ มีเหตุผลเชิงวิศวกรรม คือเมื่อระบบเลย ระดับ “รุนแรงเต็มพิกัด” ไปแล้ว การให้ดัชนีโตต่อไปไม่ได้เพิ่มข้อมูลสำหรับการตัดสิน แต่จะทำให้ค่าที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์เพี้ยนไปตามขนาดของเหตุการณ์

ฮิสเทอรีซิสและเวลาหน่วงคงสถานะ ถ้าใช้ระดับตัดสินเพียงค่าเดียวบน S ตัวกำกับจะสั่นไปมา (chatter) รอบระดับนั้น ตัวกำกับจึงใช้ตัวเปรียบเทียบสองระดับแบบไม่สมมาตร พร้อมเวลาหน่วงคงสถานะขั้นต่ำ

$$\begin{aligned} \text{GFL} \rightarrow \text{GFM}: &\quad S \geq \Gamma_{\text{on}} = 0.65 \text{ ต่อเนื่องเป็นเวลา } T_{d,\text{on}} = 0.10\,\text{s}, \\ \text{GFM} \rightarrow \text{GFL}: &\quad S \leq \Gamma_{\text{off}} = 0.35 \text{ ต่อเนื่องเป็นเวลา } T_{d,\text{off}} = 1.00\,\text{s}. \end{aligned} \tag{5}$$

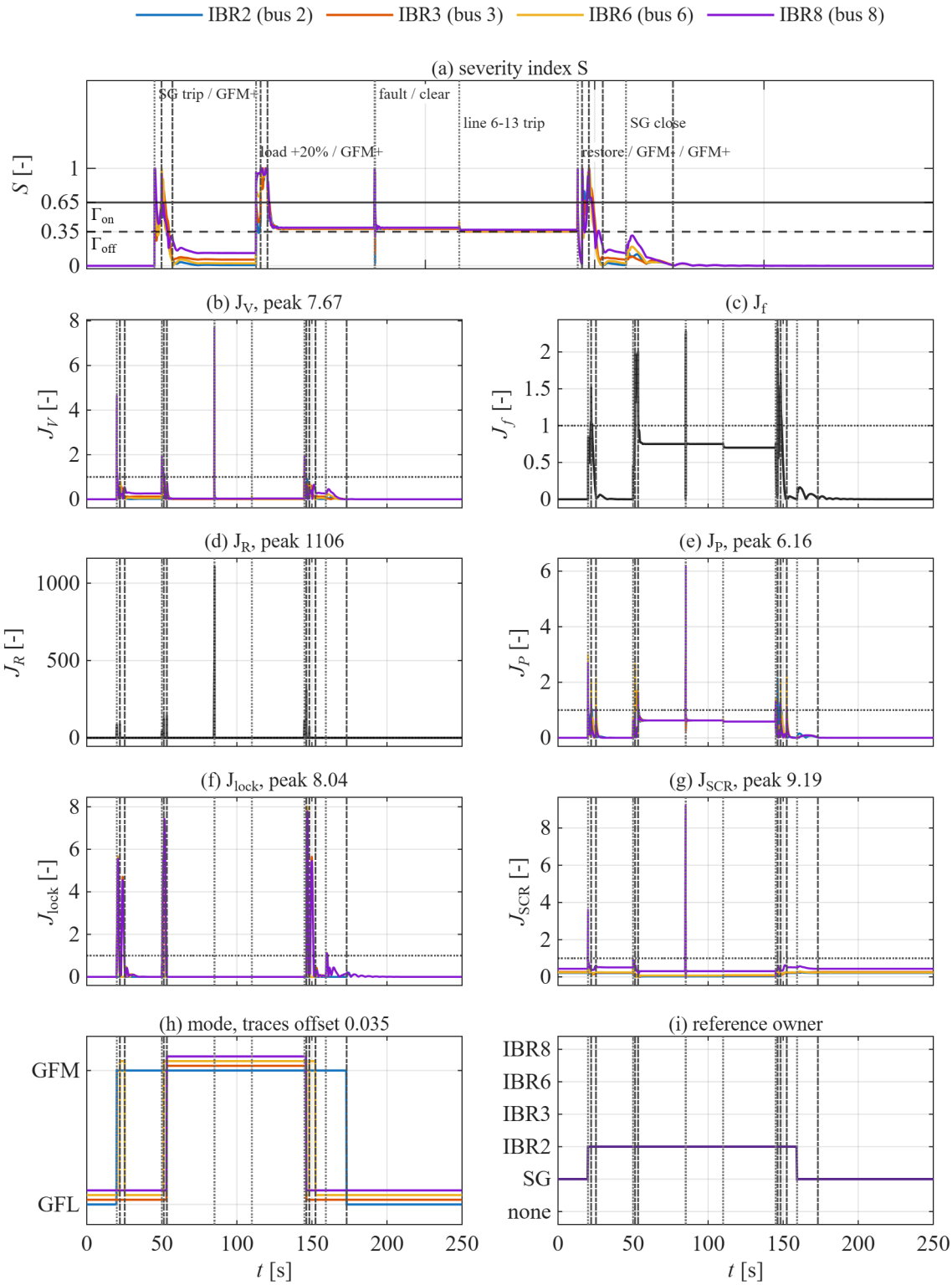
อ่านสมการนี้อย่างไร มีกลไกป้องกันการสั่นสองชั้นซ้อนกัน ชั้นแรกคือช่องว่าง $\Gamma_{\text{on}} > \Gamma_{\text{off}}$ ซึ่งสร้างแถบฮิสเทอรีซิสกว้าง 0.30 ดังนั้นเมื่ออุปกรณ์เข้าโหมด GFM แล้ว ความรุนแรงต้องลดลงต่ำกว่า 0.35 ไม่ใช่เพียง ต่ำกว่า 0.65 จึงจะมีสิทธิ์กลับ ชั้นที่สองคือเวลาหน่วงที่ไม่สมมาตรอย่างจงใจ ($T_{d,\text{on}} \ll T_{d,\text{off}}$): เข้าเร็วภายใน 0.10 s แต่ออกช้า ต้องนิ่งครบ 1.00 s ตรรกะเชิงวิศวกรรมคือ ต้นทุนของการเพิ่มการพยุงแรงดันเร็ว เกินความจำเป็นนั้นต่ำ แต่ต้นทุนของการถอนการพยุงเร็วเกินไปคือระบบอาจไม่มีแหล่งอ้างอิง แรงดันในจังหวะที่ยังไม่นิ่งจริง กลไกจึง “รีบช่วย และลังเลที่จะเลิกช่วย”

นอกเหนือจากตรรกะข้างต้น ยังมีเกตกันการสูญเสียแหล่งอ้างอิง (reference-loss guard) ที่ทำงานแยกและมาก่อนเสมอ: การตัด SG จะถูก*ปฏิเสธ*เลยถ้าหลังเปิดเบรกเกอร์แล้ว เกาะไฟฟ้าที่ยังมีไฟไม่เหลืออุปกรณ์สร้างแรงดันแม้แต่ตัวเดียว เหตุผลคือเครือข่าย ต้องไม่มีแม้แต่ขั้นเวลาเดียวที่ปราศจากแหล่งอ้างอิงแรงดัน มิฉะนั้นสมการ (1) จะไม่มีตัวกำหนดมุมอ้างอิงและระบบจะเสียเงื่อนไข gauge ทางคณิตศาสตร์ เกตนี้ทำงาน*ก่อน*ที่นิวตันจะถูกเรียกแม้ครั้งเดียว และผลของมันวัดได้: แขนที่ล็อก IBR ทุกตัว ไว้ที่ GFL ถูกปฏิเสธที่ $t = 20.000$ s พอดี ซึ่งเป็นวินาทีที่ตัด SG

3.1 หลักฐานการตัดสินใจ: ดัชนีทุกตัวบนแกนเวลาเดียวกัน

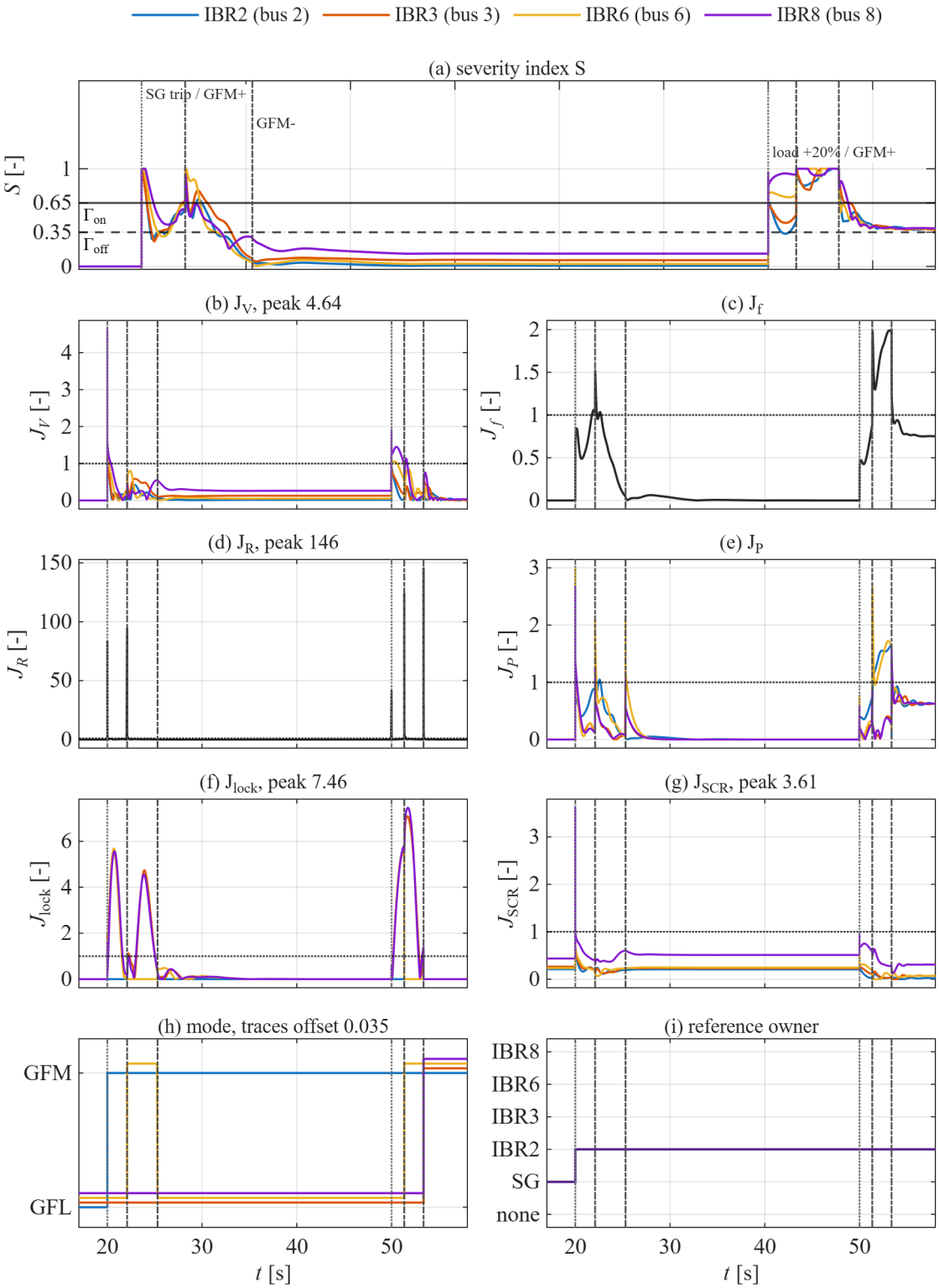
รูปที่ 1 วางดัชนีทุกตัวบนหน้าเดียวและใช้แกนเวลาเดียวกันทุกแผง เพื่อให้ อ่านค่าได้ ณ วินาทีที่ตัวกำกับสั่งสลับจริง เส้นแนวตั้งมี*สองตระกูล* ซึ่งต้องไม่ สับสนกัน: เส้นจุดคือเหตุการณ์รบกวนที่ตั้งไว้ล่วงหน้า ($20, 50, 85, 110, 145$ s และเวลาต่อกลับจริง) ส่วนเส้นจุด–ขีดคือ*คำสั่งของตัวกำกับ*เอง (การเลื่อนขึ้นและการปลดโหมด) สองตระกูลนี้ไม่ตรงกันเลยแม้แต่จุดเดียวในการรันนี้ ซึ่ง เป็นเหตุผลที่กราฟที่ทำเครื่องหมายเฉพาะเหตุการณ์รบกวนจะมองไม่เห็นว่าการสลับเกิดเมื่อใด

แผง (a) คือตัวแปรที่ตัดสินใจจริง พร้อมเส้น Γ_{on} และ Γ_{off} แผง (b), (c) คือสองพจน์ที่ประกอบเป็น S ส่วนแผง (d)–(g) เป็นดัชนีอ้างอิงที่**ไม่เข้าเกตใด** คำนวณหลังวิถีเสร็จแล้วล้วน ๆ จึงจัดชั้นเป็น ASSUMED_DIAGNOSTIC และห้ามใช้สนับสนุนข้ออ้างความพร้อมใช้งาน จุดที่ควรสังเกต: J_f และ J_R เป็นปริมาณของ*ระบบ* (คิดจากความถี่จุดศูนย์กลางความเฉื่อย) จึงมี เส้นเดียว ไม่ใช่สี่เส้น และ J_{lock} เป็นศูนย์พอดีบนกิ่ง GFM โดยโครงสร้าง เพราะ GFM ไม่มี PLL ไม่ใช่เพราะวัดไม่ได้

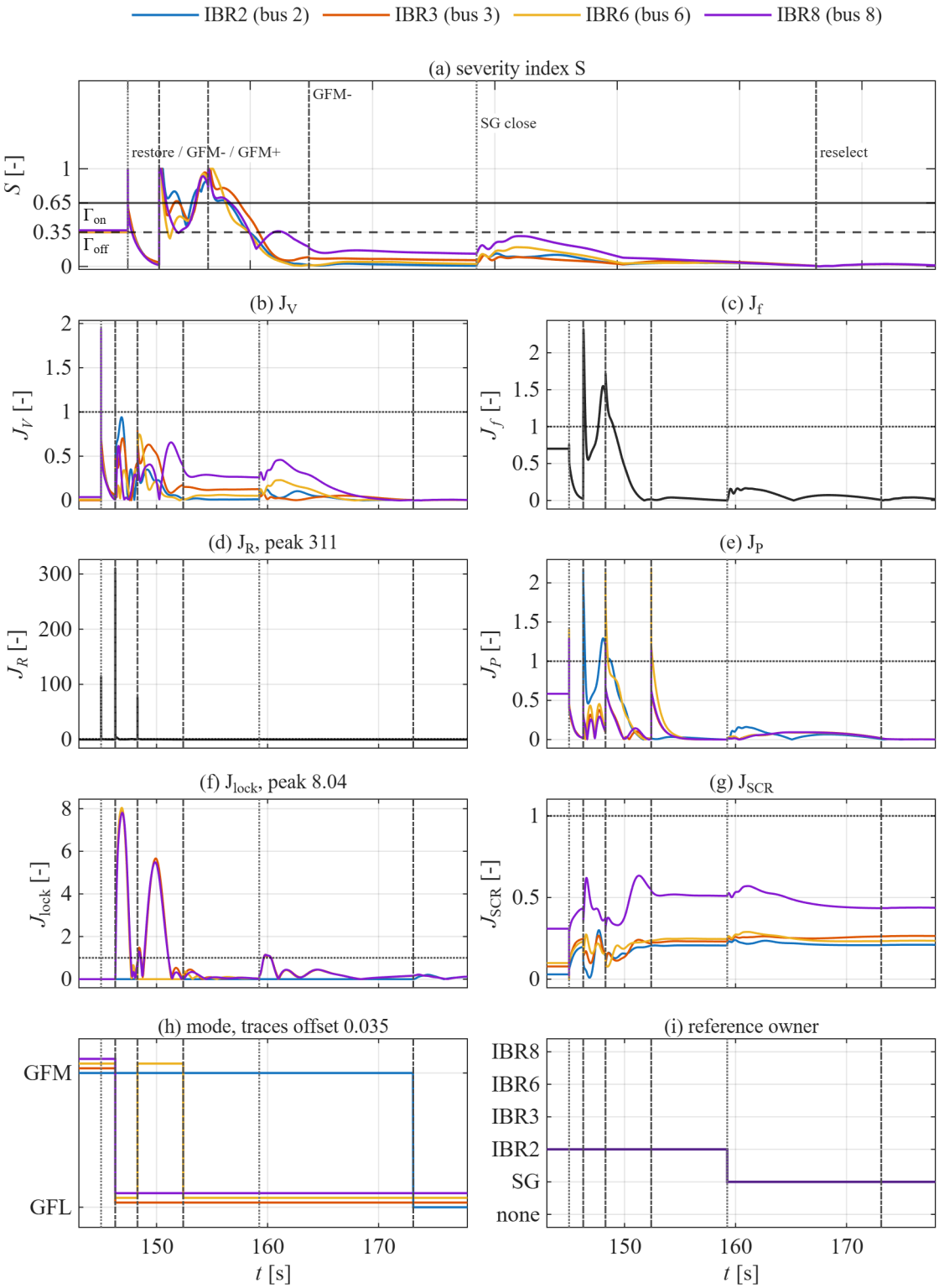


รูปที่ 1: หลักฐานการตัดสินใจสลับโหมด ทุกแผงใช้แกนเวลาเดียวกันและเส้นเหตุการณ์ชุดเดียวกัน (a) ดัชนีความรุนแรง $S = \mathrm{sat}_{[0,1]}(0.5J_V + 0.5J_f)$ พร้อมเส้นเกณฑ์ $\Gamma_{\mathrm{on}} = 0.65$ และ $\Gamma_{\mathrm{off}} = 0.35$ (b) J_V (c) J_f ของระบบ (d) J_R ของระบบ (e) J_P (f) J_{lock} (g) J_{SCR} (h) โหมด GFL/GFM รายตัว (i) เจ้าของมุมอ้างอิง เส้นจุด: เหตุการณ์รบกวน เส้นจุด–ขีด: คำสั่งของตัวกำกับ แผง (a)–(c) เป็นตัวตัดสิน แผง (d)–(g) เป็นดัชนีอ้างอิงที่ไม่เข้าเกตใด

หน้าต่างสองช่วงที่การสลับเกิดขึ้นจริงถูกขยายไว้ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ในสองรูปนี้เส้นทั้งสองตระกูลถูกกำกับชื่อครบ จึงอ่านได้ ว่าค่าดัชนีอยู่ที่เท่าไรในวินาทีที่คำสั่งเกิด



รูปที่ 2: ช่วงสร้างเกาะไฟฟ้า $t \in [17, 58]$ s ครอบคลุมการตัด SG การเลื่อนโหมดขึ้น สองครั้งแรก การปลดหนึ่งครั้ง และโหลดเพิ่มแบบขั้นแผงและเส้นเหมือนรูปที่ 1 ทุกประการ ต่างเพียงช่วงแกนเวลา ไม่มีจุดตัวอย่างใดถูกตัดหรือแก้ค่า



รูปที่ 3: ช่วงต่อกลับและคืนหน้าที่ $t \in [143, 178]$ s เห็นการปลดโหมด การเลื่อนขึ้น ชดเชยหนึ่งครั้ง การต่อกลับที่ 159.252 s และการคืนความเป็นเจ้าของมุม อ้างอิงให้ SG แผงและเส้นเหมือนรูปที่ 1 ทุกประการ

4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส: แบบจำลองอันดับหกและการพิสูจน์

SG ในงานนี้เป็นเครื่องอันดับหก (โครงสร้างตาม IEEE 1110 Model 2.2 / GENTPJ แบบ โรเตอร์กลม) มีเวกเตอร์สเตตและอินพุต

$$x_{\text{sg}} = [\,\delta,\ \omega,\ E'_q,\ E'_d,\ E''_q,\ E''_d\,]^\top, \qquad u_{\text{sg}} = [\,T_m,\ E_{fd}\,]^\top, \tag{6}$$

โดย δ คือมุมโรเตอร์ ω คือความเบี่ยงเบนความเร็วต่อหน่วย (สลิป) E'_q, E'_d คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ และ E''_q, E''_d คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ย่อย อินพุตควบคุมสองตัวคือ T_m (ทอร์กทางกล) และ E_{fd} (แรงดันกระตุ้นสนาม) ถูกตรึงไว้ที่ค่าที่ได้จากการแก้จุดสมดุลของเครือข่ายผสม และไม่ถูกแก้ใหม่ทุกขั้นเวลา เหตุที่ตรึงได้คือในสถานการณ์นี้ไม่มีการจำลอง governor/AVR แบบวงปิดของ SG เอง สิ่งที่สนใจคือพฤติกรรมของเครื่องเมื่อถูกตัดออกและต่อกลับ ไม่ใช่การตอบสนองของระบบ ควบคุมเชื้อเพลิงและการกระตุ้น

4.1 การอนุมานทีละอันดับ

สมการของเครื่องขณะเชื่อมต่อเครือข่าย เขียนทีละพจน์ตรงตามที่โค้ดคำนวณ คือ

$$\dot{\delta} = \omega_0\,\omega, \tag{7}$$

$$2H\,\dot{\omega} = T_m - T_e - D\,\omega, \tag{8}$$

$$T'_{d0}\,\dot{E}'_q = E_{fd} + c_d E''_q - d_d E'_q, \tag{9}$$

$$T'_{q0}\,\dot{E}'_d = c_q E''_d - d_q E'_d, \tag{10}$$

$$T''_{d0}\,\dot{E}''_q = E'_q - E''_q - (X'_d - X''_d)\,I_d, \tag{11}$$

$$T''_{q0}\,\dot{E}''_d = E'_d - E''_d + (X'_q - X''_q)\,I_q, \tag{12}$$

โดย $\omega_0 = 2\pi f_0$ ทอร์กไฟฟ้าช่องอากาศที่ปิดสมการการแกว่ง (8) คือ

$$T_e = V_d I_d + V_q I_q + R_a\,(I_d^2 + I_q^2), \tag{13}$$

และสัมประสิทธิ์การประกบฟลักซ์ทั้งสี่นิยามจากบันไดค่ารีแอกแตนซ์ว่า

$$c_d = \frac{X_d - X'_d}{X'_d - X''_d}, \quad d_d = \frac{X_d - X''_d}{X'_d - X''_d}, \quad c_q = \frac{X_q - X'_q}{X'_q - X''_q}, \quad d_q = \frac{X_q - X''_q}{X'_q - X''_q}. \tag{14}$$

แต่ละอันดับคืออะไร สมการ (7)–(8) คือพลวัตทางกล (อันดับสอง) ได้แก่มุมและความเร็ว โดย (8) คือสมการการแกว่ง (swing equation) ที่กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนความเร็วเป็นสัดส่วนกับส่วนต่างระหว่างทอร์กทางกล ที่ป้อนเข้ากับทอร์กไฟฟ้าที่ถูกดึงออก หักด้วยการหน่วง $D\omega$ สมการ (9)–(10) คือฟลักซ์ชั่วครู่ (ขดลวดสนามโรเตอร์และแดมเปอร์ แกน q) ซึ่งเปลี่ยนบนค่าคงที่เวลาช้า T'_{d0}, T'_{q0} ส่วน สมการ (11)–(12) คือฟลักซ์ชั่วครู่ย่อย (ขดลวดแดมเปอร์) ที่ เปลี่ยนบนค่าคงที่เวลาเร็ว T''_{d0}, T''_{q0} พจน์ปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ $-(X'_d - X''_d)I_d$ และ $+(X'_q - X''_q)I_q$ คือสิ่งที่ประกบฟลักซ์เร็วเข้ากับกระแส สเตเตอร์ พูดอย่างรวบยอดคือ แบบจำลองนี้แยกพลวัตออกเป็นสามช่วงเวลา: กลไกทางกลที่ช้า ที่สุด ฟลักซ์สนามที่เร็วกว่า และฟลักซ์แดมเปอร์ที่เร็วที่สุด

หลักยึดของการพิสูจน์ — เอกลักษณ์ $d - c = 1$ จาก (14) จะได้

$$d_d - c_d = \frac{(X_d - X''_d) - (X_d - X'_d)}{X'_d - X''_d} = \frac{X'_d - X''_d}{X'_d - X''_d} = 1, \qquad \text{และในทำนองเดียวกัน } d_q - c_q = 1. \tag{15}$$

พิจารณาสภาวะคงตัวขณะเปิดวงจร ($I_d = I_q = 0, \dot{x} = 0$) จาก (11) ได้ $E''_q = E'_q$ แทนกลับใน (9) จะได้

$$0 = E_{fd} + c_d E'_q - d_d E'_q = E_{fd} - (d_d - c_d)E'_q = E_{fd} - E'_q \implies E'_q = E_{fd}. \tag{16}$$

ดังนั้นเอกลักษณ์ (15) คือสิ่งที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสนามขณะเปิดวงจร เท่ากับแรงดันกระตุ้นที่ป้อนเข้าพอดี ซึ่งเป็นการตรวจความสอดคล้องมาตรฐานของการ พารามิเตอร์ฟลักซ์แบบนี้ และเป็นเหตุผลที่สัมประสิทธิ์ต้องเขียนเป็น*อัตราส่วน* ตาม (14) ไม่ใช่ค่าคงที่อิสระที่ปรับได้ตามใจ การอนุมานเดียวกันบนแกน q ให้ $E'_d = 0$ ขณะเปิดวงจร เพราะไม่มีแหล่งกระตุ้นที่เทียบเท่า E_{fd} บนแกนนั้น ประโยชน์เชิงปฏิบัติของเอกลักษณ์นี้คือ ใช้เป็นการตรวจสอบข้อผิดพลาดของการถอดสมการได้ ทันทีโดยไม่ต้องรันการจำลอง: หากโค้ดใดให้ $d_d - c_d \neq 1$ แสดงว่าถอดสมการผิด

4.2 อินเทอร์เฟซพีชคณิตของสเตเตอร์

กระแสสเตเตอร์*ไม่ได้* ถูกย้อนคำนวณจากกำลัง แต่ถูกแก้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วครู่ ย่อยที่อยู่หลังรีแอกแตนซ์ชั่วครู่ย่อย โดยฉายแรงดันที่ขั้วเชิงซ้อน V ลงบนกรอบ dq ของเครื่อง (V_d, V_q) แล้วกำหนด $r_d = V_d - E''_d, r_q = V_q - E''_q$ จะได้

$$\det = X''_d X''_q + R_a^2, \qquad I_d = \frac{-R_a r_d - X''_q r_q}{\det}, \qquad I_q = \frac{X''_d r_d - R_a r_q}{\det}, \tag{17}$$

ซึ่งเป็นอินเวอร์สที่แน่นอนของความสัมพันธ์สเตเตอร์ชั่วครู่ย่อย $V_d = E''_d - R_a I_d + X''_q I_q$ และ $V_q = E''_q - R_a I_q - X''_d I_d$ ทอร์ก ไฟฟ้า (13) ใช้ I_d, I_q ชุดเดียวกันนี้

ทำไมต้องทำแบบนี้ หากย้อนคำนวณกระแสจากกำลังที่ต้องการ ($I = S^*/V^*$) กระแสจะกลายเป็นตัวแปรที่ถูกกำหนดจากภายนอกและตัดพลวัตของฟลักซ์ออกจากวงจร ผลคือ เครื่องจะไม่แสดงพฤติกรรมชั่วครู่ย่อยเลย และค่ากระแสตอนเกิดฟอลต์จะไม่สะท้อนความจริง การแก้จาก (17) รักษาให้กระแสเป็น*ผลลัพธ์*ของสเตตฟลักซ์และแรงดัน ที่ขั้วเสมอ ซึ่งจำเป็นต่อการตรวจสอบการต่อกลับของเบรกเกอร์

4.3 ลิมิตเอกฐานที่ตรึงสเตต E'_d

สำหรับข้อมูลเครื่องที่ใช้ในงานนี้ ค่าคงที่เวลาขณะเปิดวงจรของฟลักซ์ชั่วครู่แกน q ถูกกำหนดไว้ที่ลิมิตเอกฐาน $T'_{q0} = 0$ (เป็นกรณีโรเตอร์กลมที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว) เมื่อเป็นเช่นนี้ สมการ (10) ไม่ใช่สมการเชิงอนุพันธ์อีกต่อไป แต่ลดรูปเป็น ข้อบังคับเชิงพีชคณิต

$$0 = c_q E''_d - d_q E'_d. \tag{18}$$

สำหรับเครื่องนี้ $c_q = 0$ และ $d_q = 1$ ดังนั้น $E'_d \equiv 0$ โค้ดตรวจพบเงื่อนไข $T'_{q0} = 0$ แบบตรงตัว และ*ถอด* E'_d (สเตตดัชนีที่ 4) ออกจากชุดที่ถูก อินทิเกรต โดยคงค่าไว้ที่ค่าพีชคณิต 0 ผลคือ SG ส่งสเตตพลวัตเข้าระบบรวม **ห้า** ตัว คือ $[\delta, \omega, E'_q, E''_q, E''_d]$ ไม่ใช่หกตัว นี่คือลิมิต เอกฐานแบบ SOURCE_DEFINED ไม่ใช่ความสะดวกเชิงตัวเลข เพราะเป็นการลดรูป $T'_{q0} \to 0$ ของสมการชุดเดิม การแยกแยะนี้สำคัญ: ถ้าปล่อยให้ E'_d ถูกอินทิเกรต ต่อโดยหารด้วย $T'_{q0} = 0$ จะเกิดการหารด้วยศูนย์ และถ้า “แก้” ด้วยการใส่ค่า T'_{q0} เล็ก ๆ แทน จะกลายเป็นการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของเครื่องเพื่อความสะดวกเชิง ตัวเลข ซึ่งขัดกับข้อกำหนดความสมบูรณ์เชิงตัวเลขของโครงการ

4.4 การไหลตามแรงเฉื่อยเมื่อเบรกเกอร์เปิด

เมื่อเบรกเกอร์ของ SG เปิดที่ $t = 20$ s เครื่องจักร*ไม่ได้*หายไปจากเวกเตอร์สเตต สิ่งที่เกิดขึ้นคือกระแสอัดเข้าเครือข่ายกลายเป็นศูนย์ ($I_d = I_q = 0$ จึงได้ $T_e = 0$) และฟลักซ์สลายตัวบนกิ่งเปิดวงจรของ (9)–(12) (พจน์ปฏิกิริยา อาร์เมเจอร์หายไปเพราะ $I_d = I_q = 0$) ขณะที่สมการการแกว่ง (7)–(8) ไหลต่อไปตามแรงเฉื่อยบนทอร์กทางกลที่ถูกตรึงไว้ แผนที่ที่รายงานว่า SG อินทิเกรตสเตต กี่ตัวนั้นไม่ขึ้นกับบริบท: มันคืนค่า $[1, 2, 3, 5, 6]$ ทั้งกรณีเบรกเกอร์ปิดและเปิด ผลที่ตามมาคือการสูญเสีย SG slack *ไม่ได้* เปลี่ยนจำนวนสเตตของ SG เอง มิติของระบบรวมเปลี่ยนเพราะ IBR สลับโหมดเท่านั้น (หัวข้อ 5)

เหตุใดต้องเก็บ SG ไว้ในเวกเตอร์สเตต เพราะการต่อกลับในช่วง 6 ต้องอาศัยมุมและ ความเร็วของโรเตอร์ที่ผ่านการไหลตามแรงเฉื่อยมา ถ้าลบเครื่องออกจากระบบตอนถูกตัด เมื่อ จะต่อกลับก็จะไม่มีสถานะภายในให้เทียบเฟส และการต่อกลับจะกลายเป็นการสร้างเครื่องใหม่ ที่มุมใดก็ได้ ซึ่งไม่สอดคล้องกับกายภาพของการซิงโครไนซ์

5 อินเวอร์เตอร์: แบบจำลองสองโหมดขนาด 17 สเตต

IBR แต่ละตัวเป็น*อุปกรณ์ชิ้นเดียว*ที่สามารถแสดงตัวควบคุมได้สองแบบบนภาคกำลัง ร่วมชุดเดียวกัน เวกเตอร์สเตตเต็มมีขนาดคงที่ 17 ตัว

$$x_{\text{IBR}} = \Big[\underbrace{i_d,\ i_q,\ V_{dc}}_{(3)\ \text{แอ็กทีฟตลอด}} \ \Big|\ \underbrace{x_{\text{GFL}}\ (6)}_{\substack{\text{ดัชนี } 4\text{-}9 \\ \text{แอ็กทีฟเฉพาะ GFL}}} \ \Big|\ \underbrace{x_{\text{GFM}}\ (7)}_{\substack{\text{ดัชนี } 10\text{-}16 \\ \text{แอ็กทีฟเฉพาะ GFM}}} \ \Big|\ \underbrace{I_{dc}}_{\substack{\text{ดัชนี } 17 \\ \text{แอ็กทีฟตลอด}}}\Big]^\top \in \mathbb{R}^{17}, \tag{19}$$

ซึ่งเรียงตามลำดับจริงในโค้ด (ABI) โดยบล็อกตัวควบคุมเขียนแยกกันดังนี้

$$x_{\text{GFL}} = [\,\delta_{\text{PLL}},\ \xi_{\text{PLL}},\ \xi_P,\ \xi_Q,\ \xi_{Id},\ \xi_{Iq}\,], \tag{20}$$

$$x_{\text{GFM}} = [\,\delta_{\text{VSG}},\ \omega_{\text{VSG}},\ E,\ \xi_{Vd},\ \xi_{Vq},\ \xi_{Id},\ \xi_{Iq}\,]. \tag{21}$$

บล็อกภาคกำลังคือ $x_{\text{pl}} = (i_d, i_q, V_{dc}, I_{dc})$ และ*ไม่ต่อเนื่อง* กัน: กระแสแหล่ง DC อยู่ที่ดัชนี 17 หลังบล็อกตัวควบคุมสองชุด เพราะถูกเพิ่มเข้ากับ เลย์เอาต์ที่ดัชนี 1–16 เผยแพร่ไปแล้ว การต่อท้ายแทนการแทรกทำให้ดัชนีเดิมทุกตัวยังหมาย ความตรงเดิม ซึ่งเป็นเหตุผลที่ช่วง 4–9 และ 10–16 ในหัวข้อนี้ไม่เปลี่ยนจาก รอบก่อน ๆ

ณ ขณะใดขณะหนึ่ง มีเพียง*ภาพฉาย* (projection) ของ (19) เท่านั้น ที่ถูกอินทิเกรต แผนที่ดัชนีที่แอ็กทีฟคืนค่า

$$\mathcal{A}_{\text{GFL}} = \{1{:}9,\ 17\}, \qquad \mathcal{A}_{\text{GFM}} = \{1{:}3,\ 10{:}16,\ 17\}, \qquad \mathcal{A}_{\text{tripped}} = \varnothing, \tag{22}$$

กล่าวคือ 10 สเตตแอ็กทีฟในโหมด GFL, 11 สเตตในโหมด GFM และไม่มีสเตตใดแอ็กทีฟเมื่อ อุปกรณ์ถูกตัดออก จุดตัด $\mathcal{A}_{\text{GFL}} \cap \mathcal{A}_{\text{GFM}} = \{1, 2, 3, 17\}$ คือภาค กำลังร่วมพอดี และยูเนียนคือทั้งชุด $\{1{:}17\}$ บล็อกภาคกำลังร่วมแอ็กทีฟตลอดเวลา ส่วนบล็อกตัวควบคุมสองชุดใช้งานแบบไม่ทับซ้อนกัน (mutually exclusive) จำนวนสเตต แอ็กทีฟจึงเป็น 10 หรือ 11 ไม่เคยเป็น 17 — มิติซูเปอร์เซ็ตไม่เคยเป็นมิติ พลวัต

ตารางที่ 3 แจกแจงทั้ง 17 สเตตตามลำดับดัชนีจริง พร้อมระบุว่าสเตต ใดแอ็กทีฟในโหมดใด สัญลักษณ์ ● หมายถึงถูกอินทิเกรต และ ○ หมายถึงถูก ตรึงค่าไว้ (frozen) ประเด็นที่ควรชี้ให้เห็นตอนนำเสนอคือ PLL ปรากฏ*เฉพาะ*ใน บล็อก GFL และไม่มีอยู่ในบล็อก GFM เลย ขณะที่บล็อก GFM มีสมการการแกว่งเสมือนแทน

ตารางที่ 3: แจกแจงสเตตทั้ง 17 ตัวของ IBR ตามลำดับดัชนีในโค้ด: ดัชนี 1–3 คือภาคกำลัง ร่วมที่แอ็กทีฟทั้งสองโหมด ดัชนี 4–9 คือตัวควบคุม GFL ดัชนี 10–16 คือตัวควบคุม GFM และดัชนี 17 คือกระแสแหล่ง DC ที่แอ็กทีฟทั้งสองโหมด

#	สเตต	ความหมาย	GFL	GFM
ภาคกำลังร่วม (แอ็กทีฟทั้งสองโหมด)				
1	i_d	กระแสตัวกรองแกน d	●	●
2	i_q	กระแสตัวกรองแกน q	●	●
3	V_{dc}	แรงดันบัส DC	●	●
ตัวควบคุม GFL (ตรึงเมื่ออยู่ในโหมด GFM)				
4	δ_{PLL}	มุมของ PLL	●	○
5	ξ_{PLL}	ตัวอินทิเกรตของ PLL	●	○
6	ξ_P	ตัวอินทิเกรตวงรอบกำลังจริง	●	○
7	ξ_Q	ตัวอินทิเกรตวงรอบกำลังรีแอกทีฟ	●	○
8	ξ_{Id}	ตัวอินทิเกรตกระแสชั้นในแกน d	●	○
9	ξ_{Iq}	ตัวอินทิเกรตกระแสชั้นในแกน q	●	○
ตัวควบคุม GFM (ตรึงเมื่ออยู่ในโหมด GFL)				
10	δ_{VSG}	มุมของเครื่องซิงโครนัสเสมือน	○	●
11	ω_{VSG}	ความถี่ของเครื่องซิงโครนัสเสมือน	○	●
12	E	แอมพลิจูดแรงดันที่วงรอบ Q-V สร้าง	○	●
13	ξ_{Vd}	ตัวอินทิเกรตวงรอบแรงดันแกน d	○	●
14	ξ_{Vq}	ตัวอินทิเกรตวงรอบแรงดันแกน q	○	●
15	ξ_{Id}	ตัวอินทิเกรตกระแสชั้นในแกน d	○	●
16	ξ_{Iq}	ตัวอินทิเกรตกระแสชั้นในแกน q	○	●
แหล่ง DC (แอ็กทีฟทั้งสองโหมด)				
17	I_{dc}	กระแสแหล่งจ่าย DC วงจร Thevenin	●	●
จำนวนสเตตแอ็กทีฟรวม			*10*	*11*

5.1 สเตตความหน่วงคำสั่งที่ถูกลดออก

แผนภาพบล็อกของแหล่งอ้างอิงมีความหน่วงของตัวขับอันดับหนึ่งหนึ่งตัวต่อหนึ่งแกน $T_d \dot{V}_{\text{del}} = v_{\text{cmd}} - V_{\text{del}}$ ซึ่งค่าคงตัวเวลาทาง กายภาพของมันคือความหน่วงของคอนเวอร์เตอร์เชิงเลข $T_d = 1.5/f_{\text{sw}} \approx 0.3$ ms ที่ $f_{\text{sw}} = 5$ kHz ค่านี้เล็กกว่าขั้นเวลาแบบเฟเซอร์ที่ใช้ในงานนี้มากกว่าสอง อันดับของสิบ ดังนั้นตามทฤษฎีการก่อกวนเอกฐาน (singular perturbation) ความหน่วงที่เร็ว กว่ามากจะยุบลงบนแมนิโฟลด์ช้าของตัวเอง $V_{\text{del}} = v_{\text{cmd}}$ สเตตความ หน่วงสองตัวต่อหนึ่งกิ่งจึงถูกกำจัดออกเชิงพีชคณิต และสมการกระแสของตัวกรองใช้คำสั่ง แรงดัน v_{cd}, v_{cq} โดยตรง

นี่คือการลดอันดับแบบจำลองมาตรฐานซึ่งไม่เปลี่ยนทั้งจุดสมดุลและพลวัตของสเตตที่คงไว้ และยังกำจัดโพลที่อยู่ราว 530 Hz ซึ่งแบบจำลองเครือข่ายแบบเฟเซอร์ RMS ไม่สามารถ แทนได้อยู่แล้ว การลดอันดับนี้ทำให้ซูเปอร์เซ็ตสองโหมดลดจาก 20 เหลือ 16 สเตต และแต่ละกิ่งเดี่ยว

ลดจาก 12 เหลือ 10 สเตต จากนั้นกระแสแหล่ง DC I_{dc} (ดัชนี 17 ของ (19) ดูการอนุมานวงจรที่ย่อหน้าแถว (3) ด้านล่างและหัวข้อการมีส่วนร่วมของ DC) เพิ่มอีกหนึ่งสเตต ให้ขนาด 17 และ 11 ต่อกิ่งเดี่ยว การลดอันดับจัดเป็น PROJECT_DERIVED และเป็นการตัดสินของเจ้าของงาน ดูบันทึกข้อบกพร่อง TD-2026-08-12-01

*ข้อความที่ต้องระบุตาม*จริง รายงานฉบับก่อนหน้านี้พิมพ์ผังสเตตขนาด 20 ตัว ก่อนการลดอันดับ ซึ่งเป็นผังที่แบบจำลองที่รันจริง*ไม่มี*อีกแล้ว

ตัวดำเนินการสองตัวที่ใช้ซ้ำในทั้งสองโหมด $\Pi_I(a, b; I_{\text{max}})$ คือตัวจำกัดกระแสแบบ*วงกลม*: ถ้า $r = \sqrt{a^2 + b^2} > I_{\text{max}}$ จะสเกลคู่อันดับ $(a, b) \mapsto (a, b)\, I_{\text{max}}/r$ ถ้าไม่เกินก็คืนค่าเดิม ส่วนที่ถูก ตัดออกเรียกว่าเรซิดวลของตัวจำกัด $r_i = (a, b) - \Pi_I(a, b)$ เหตุที่ต้องจำกัดเป็นวงกลม ไม่ใช่จำกัดแยกแกน เพราะขนาดกระแสจริงของอินเวอร์เตอร์คือขนาดเวกเตอร์รวม การจำกัดแยก แกนจะยอมให้ขนาดรวมทะลุพิกัดได้ถึง $\sqrt{2}$ เท่า

$\mathcal{H}(e, \gamma, r_i, \text{sat})$ คือตัวอินทิเกรตแบบมีเงื่อนไขกันการอิ่มตัว สะสม: คืนค่า 0 เมื่อค่าอ้างอิงถูกตัด*และ*ความผิดพลาดกำลังจะสะสมต่อไปในทิศ เดิม (เงื่อนไข sat เป็นจริง และ $\gamma\, e\, r_i > 0$) และคืนค่า e ในกรณี อื่น กลไกนี้ป้องกันอาการที่ตัวอินทิเกรตสะสมค่าไว้ระหว่างที่เอาต์พุตถูกตัด แล้วทำให้ ระบบตอบสนองช้าผิดปกติเมื่อออกจากการอิ่มตัว

กระแสอัดเข้าเครือข่ายและกำลังที่ขั้วนิยามว่า $I = (i_d + \mathrm{j}i_q)e^{\mathrm{j}\theta}/\kappa$, $S = V\overline{I}$, $P_{\text{inv}} = \kappa\Re S$, $Q_{\text{inv}} = \kappa\Im S$ โดย $\kappa = S_{\text{base}}/M_{\text{base}}$ และ $(v_d, v_q) = \Re, \Im\,(Ve^{-\mathrm{j}\theta})$ การใช้ κ อย่างสม่ำเสมอทั้ง ในกระแสและกำลังเป็นสิ่งจำเป็น มิฉะนั้นฐานต่อหน่วยของกระแส กำลัง และเกนของตัวควบคุม จะไม่สอดคล้องกัน

5.2 ภาคกำลังร่วม (สเตต 1–3)

พลวัตกระแสของตัวกรองแบบ L และบัส DC ใช้ร่วมกันทั้งสองโหมดและแอ็กทีฟตลอดเวลา เขียนหนึ่งสเตตต่อหนึ่งบรรทัดตามลำดับดัชนี

$$\frac{L}{\omega_b}\,\dot{i}_d = v_{cd} - v_d - R\,i_d + \omega L\,i_q, \qquad \text{(1) กระแสตัวกรองแกน } d \qquad (23)$$

$$\frac{L}{\omega_b}\,\dot{i}_q = v_{cq} - v_q - R\,i_q - \omega L\,i_d, \qquad \text{(2) กระแสตัวกรองแกน } q \qquad (24)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C}\left[\frac{E_{dc}-V_{dc}}{R_{dc}} - \frac{P_{ac}}{V_{dc}} - \frac{\max(0,\, V_{dc} - V_{dc}^{\max})}{R_{ch}}\right], \qquad \text{(3) แรงดันบัส DC} \qquad (25)$$

โดย $R = R_f$, $L = L_f$, $C = C_{dc}$, $\omega_b = 2\pi f_b$ และ v_{cd}, v_{cq} คือคำสั่งแรงดันชั้นในที่นิยามไว้รายกิ่งด้านล่าง ส่วน E_{dc} คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งจ่าย DC, R_{dc} คือความต้านทานภายในของมัน, R_{ch} และ $V_{dc}^{\max}$ คือความต้านทานและขีดเริ่มนำกระแสของชอปเปอร์กันแรงดันเกิน และ $P_{ac} = v_{cd}i_d + v_{cq}i_q$ คือกำลังด้านคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเท่ากับกำลังที่บัสบวก กำลังสูญเสียในตัวกรอง อันเป็นกำลังที่บัส DC ต้องจ่ายจริง คำสั่งแรงดันปรากฏในแถว (1)–(2) โดยตรงแทนคำสั่งที่ผ่านความหน่วง เพราะการลดอันดับในหัวข้อย่อย 5.1

พิสูจน์ทีละแถว แถว (1)–(2) คือกฎแรงดันของ Kirchhoff คร่อมตัวกรองอนุกรม R_f, L_f ในกรอบหมุน พจน์ไขว้ $\pm\omega L$ คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการหมุนของ กรอบอ้างอิง และอัตราการหมุน ω นั้นถูกป้อนโดยตัวควบคุมที่กำลังทำงานอยู่ (PLL เมื่อเป็น GFL หรือสมการการแกว่งเสมือนเมื่อเป็น GFM) — จุดนี้เป็น*ที่เดียว*ที่ สมการภาคกำลังรับรู้ว่าโหมดเปลี่ยน จึงเป็นเหตุผลเชิงโครงสร้างว่าทำไมภาคกำลังจึงใช้ ร่วมกันได้โดยไม่ต้องเขียนสมการซ้ำสองชุด

แถว (3) คือการปิดสมการแหล่งจ่าย DC แบบ PROJECT_DERIVED: กรณีศึกษาให้เพียง สมดุลพลังงานของบัส DC คือ $C\dot{V}_{dc} = I_{dc} - P_{ac}/V_{dc}$ แต่*ไม่*ให้กฎของ I_{dc} ดังนั้นกฎนี้จึงเป็นสิ่งที่โครงการอนุมานและต้องแสดงเหตุผล แหล่งจ่ายด้าน DC ใดก็ตาม — เรกติไฟเออร์ แบตเตอรี่ สตริงเซลล์แสงอาทิตย์ในย่านแหล่งแรงดัน หรือฟีดเดอร์ DC — ในอันดับแรกคือแรงเคลื่อนไฟฟ้าหลังความต้านทานภายในรวมสายเคเบิล จึงได้ $I_{dc} = (E_{dc} - V_{dc})/R_{dc}$ หักด้วยกระแสชอปเปอร์กันแรงดันเกิน $I_{ch} = \max(0, V_{dc} - V_{dc}^{\max})/R_{ch}$ ตามที่แสดงในแถว (3)

ไม่มีพจน์ใดหักล้างกันในแถวนี้: P_{ac} เป็นตัวขับพิกัด และ C_{dc} เป็นตัวสเกล ทั้งสองจึงปรากฏจริงในเรซิดวลและในจาโคเบียน ค่า E_{dc} ไม่ใช่ค่าที่เลือกได้ตามใจ แต่ ถูก*บังคับ*โดยเงื่อนไขที่ว่าจุดจ่ายที่สั่งไว้ต้องเป็นจุดสมดุล: การให้ $\dot{V}_{dc} = 0$ ที่ $V_{dc} = V_{dc}^0$ และ $P_{ac} = P_{ac}^0$ เหลือค่าที่ยอมรับได้ เพียงค่าเดียวคือ $E_{dc} = V_{dc}^0 + R_{dc}P_{ac}^0/V_{dc}^0$ โดย $P_{ac}^0 = \kappa P_{\text{ref}} + R_f(i_{d0}^2 + i_{q0}^2)$ ผลที่ตามมามีสองข้อ: เงื่อนไขเริ่มต้นด้าน AC ที่มาจากแหล่งอ้างอิงและการไหลของกำลังในหัวข้อ 7 *ไม่*ถูกแตะต้อง (ค่า $\dot{V}_{dc}(0)$ ที่วัดได้เป็นศูนย์ในระดับความคลาดของการปัดเศษ) และเนื่องจาก E_{dc} คำนวณจาก $P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}}, V_0, R_f$ ชุดเดียวกันทั้งสองกิ่ง ค่าจึงเท่ากันใน GFL และ GFM การถ่ายโอนโหมดขณะรันจึงไม่สร้าง ขั้นกระโดดใน $\dot{V}_{dc}$ ไม่ใช่เพียงไม่สร้างขั้นใน V_{dc}

จุดสมดุลและขอบเขต การให้ $\dot{V}_{dc} = 0$ ขณะชอปเปอร์ปิดให้ $V_{dc}^2 - E_{dc}V_{dc} + R_{dc}P_{ac} = 0$ ซึ่งรากบนคือ $V_{dc} = V_{dc}^0$ ที่ภาระ ที่สั่งไว้ $P_{ac} = P_{ac}^0$ พอดี — นั่นคือสิ่งที่ตรึงค่า E_{dc} — และเลื่อน ไปตาม P_{ac} ที่ภาระอื่นทุกค่า สำหรับ $V_{dc} > E_{dc}$ ทุกพจน์ของแถว (3) เป็นลบเมื่อ $P_{ac} \geq 0$ จึงได้ $\dot{V}_{dc} < 0$ และ $V_{dc}(t) \leq \max(V_{dc}(0), E_{dc}) = E_{dc}$ *ขณะที่ตัวแปลงจ่ายกำลังออก* ความต้านทานภายในจึงเป็นขอบเขตด้วยตัวมันเอง และที่จุด ที่สั่งไว้ $E_{dc} = 1.0453$ p.u. อยู่ต่ำกว่าขีดเริ่มนำกระแสของชอปเปอร์ $V_{dc}^{\max} = 1.10$ p.u.

สมมติฐาน $P_{ac} \geq 0$ *ไม่ใช่ส่วนเกิน และมีแขนหนึ่งที่หลุดจากมัน* ขอบเขตข้างต้น ไม่ได้บอกอะไรเลยเมื่อ $P_{ac} < 0$ ตัวแปลงที่ถูกผลักให้*ดูดกำลัง* — ถูกตรึงไว้ที่ ขีดจำกัดกระแสขณะที่แรงดันและมุมของเกาะวิ่งหนีจากมัน — เปลี่ยนพจน์ภาระให้เป็นพจน์ *อัดประจุ* $+|P_{ac}|/V_{dc}$ ดังนั้น V_{dc} จึงไต่ผ่าน E_{dc} ขึ้นไปถึงชอปเปอร์ได้ กรณีนี้เกิดขึ้นจริงในแขนนโยบายควบคุมห้าแขนของงานนี้ บนสามแขนที่ไปถึงขอบฟ้า แรงดันลิงก์สูงสุดของทั้งสี่ตัวแปลงคือ 1.0108, 1.0224 และ 1.0167 p.u. ชอปเปอร์ไม่นำ กระแสเลย แต่บนแขนที่ตรึงสี่ตัวซึ่งล่ม IBR$_1$ ข้าม $V_{dc}^{\max}$ ที่ $t = 20.4573$ s และอยู่เหนือขีดนั้นต่อเนื่อง 94 ตัวอย่างที่ยอมรับจนแขนจบ ยอดสูงสุด 1.1030 p.u. โดยมี $P_{ac} \in [-0.925, -0.747]$ p.u. และ $|i| \approx 1.204$ p.u. คือถูกจำกัดกระแสและดูดกำลัง อยู่ทุกตัวอย่าง เมื่อจำกัดเฉพาะตัวอย่างของแขนเดียวกันที่ $P_{ac} \geq 0$ ยอดสูงสุดคือ 1.0482 p.u. ต่ำกว่าขีด รายงานนี้จึงระบุว่าชอปเปอร์*ทำงาน*จริงบนแขนนั้นและอยู่เฉย บนสามแขนที่รอด ไม่ใช่ระบุว่าเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่พิสูจน์แล้วว่าไม่จำเป็น การตัดสินว่ามัน นำกระแสหรือไม่บนวิถีใดทำภายหลังจาก $\max_t V_{dc}$ เทียบ $V_{dc}^{\max}$ ซึ่งแม่นยำ เพราะเงื่อนไขการนำกระแสขึ้นกับ V_{dc} เพียงตัวเดียว

5.3 GFL (สเตต 4–9): แหล่งกระแสที่มี PLL

ปริมาณพีชคณิตช่วยได้แก่ ความผิดพลาดของกำลัง $e_P = \kappa u_1 - P_{\text{inv}}$, $e_Q = \kappa u_2 - Q_{\text{inv}}$ ค่าอ้างอิงกระแสก่อนและหลังการจำกัด

$$i_{d,\text{ref}}^{\text{raw}} = k_{pP} e_P + k_{iP} \xi_P, \quad i_{q,\text{ref}}^{\text{raw}} = -(k_{pQ} e_Q + k_{iQ} \xi_Q), \quad [i_{d,\text{ref}}, i_{q,\text{ref}}] = \Pi_I(\cdot; I_{\max}), \tag{26}$$

และคำสั่งแรงดันชั้นใน $v_{cd} = v_d + R i_d - \omega L i_q + k_{pI}(i_{d,\text{ref}} - i_d) + k_{iI} \xi_{Id}$, $v_{cq} = v_q + R i_q + \omega L i_d + k_{pI}(i_{q,\text{ref}} - i_q) + k_{iI} \xi_{Iq}$ จากนั้นสเตต GFL ทั้งหกตัวเปลี่ยนแปลงทีละบรรทัดตามลำดับดัชนี

$$\dot{\delta}_{\text{PLL}} = k_{p,\text{PLL}} v_q + k_{i,\text{PLL}} \xi_{\text{PLL}}, \qquad \text{(4) มุม PLL;} \quad \omega = 1 + \dot{\delta}_{\text{PLL}}/\omega_b \tag{27}$$

$$\dot{\xi}_{\text{PLL}} = v_q, \qquad \text{(5) ตัวอินทิเกรตของ PLL} \tag{28}$$

$$\dot{\xi}_P = \mathcal{H}(e_P,\ k_{iP},\ r_{i,d},\ \text{sat}), \qquad \text{(6) ตัวอินทิเกรตกำลังจริง} \tag{29}$$

$$\dot{\xi}_Q = \mathcal{H}(e_Q,\ -k_{iQ},\ r_{i,q},\ \text{sat}), \qquad \text{(7) ตัวอินทิเกรตกำลังรีแอกทีฟ} \tag{30}$$

$$\dot{\xi}_{Id} = i_{d,\text{ref}} - i_d, \qquad \text{(8) ตัวอินทิเกรตกระแสแกน } d \tag{31}$$

$$\dot{\xi}_{Iq} = i_{q,\text{ref}} - i_q, \qquad \text{(9) ตัวอินทิเกรตกระแสแกน } q \tag{32}$$

พิสูจน์ทีละสเตต (4)–(5) คือ PLL แบบกรอบอ้างอิงซิงโครนัส หน้าที่ของมันคือ ผลักแรงดันแกน q ที่วัดได้ให้เข้าหาศูนย์ ดังนั้นเมื่อล็อกได้แล้ว $\dot{\xi}_{\text{PLL}} = v_q = 0$ กรอบอ้างอิงจะเรียงตัวตรงกับแรงดันที่ขั้ว และความถี่ ของวงรอบคือ $\omega = 1 + \dot{\delta}_{\text{PLL}}/\omega_b$ (6)–(7) คือตัวควบคุม PI ชั้นนอกของ P และ Q: ที่จุดสมดุล $\dot{\xi}_P = e_P = 0$ บังคับให้ $P_{\text{inv}} = \kappa u_1$ และ $\dot{\xi}_Q = e_Q = 0$ บังคับให้ $Q_{\text{inv}} = \kappa u_2$ กล่าวคืออุปกรณ์จ่ายได้ตามค่าสั่ง P, Q พอดี ส่วนตัว ห่อ $\mathcal{H}$ จะตรึงตัวอินทิเกรตไว้เฉพาะช่วงที่ค่าอ้างอิงกระแสอยู่บนวงกลม $I_{\max}$ เท่านั้น เครื่องหมายลบใน (7) สืบเนื่องจากนิยาม $i_{q,\text{ref}}^{\text{raw}} = -(k_{pQ} e_Q + k_{iQ} \xi_Q)$ ไม่ใช่การเดาเครื่องหมาย (8)–(9) คือตัวควบคุม PI ของกระแสชั้นใน: $\dot{\xi}_{Id} = i_{d,\text{ref}} - i_d = 0$ ทำให้กระแสตัวกรองตามค่าอ้างอิงได้ และแกน q เป็นไปในทำนองเดียวกัน

ข้อสรุปเชิงกายภาพของกิ่งนี้ GFL เป็น*แหล่งกระแส* มันต้องอาศัย PLL เพื่อ รู้มุมของกริด จึงไม่สามารถกำหนดแรงดันบนเครือข่ายที่ไร้แหล่งอ้างอิงได้ด้วยตัวเอง นี่คือเหตุผลรากฐานว่าทำไมเมื่อ SG หลุดออกไป การปล่อยให้ IBR ทุกตัวเป็น GFL ต่อจึง ไม่ใช่ทางเลือก

5.4 GFM (สเตต 10–16): แหล่งแรงดัน มีสมการแกว่งเสมือน ไม่มี PLL

กิ่งสร้างกริดแทน PLL ด้วยสมการการแกว่งของเครื่องซิงโครนัสเสมือน (virtual synchronous generator, VSG) ร่วมกับวงรอบสร้างแรงดันแบบ Q-V ค่าอ้างอิงแรงดันคือ $v_{d,\text{ref}} = E$ และ $v_{q,\text{ref}} = 0$ ความผิดพลาดแรงดันคือ $e_{vd} = E - v_d$, $e_{vq} = -v_q$ ค่าอ้างอิงกระแสก่อน/หลังการจำกัดคือ $i_{d,\text{ref}}^{\text{raw}} = k_{pV} e_{vd} + k_{iV} \xi_{Vd}$, $i_{q,\text{ref}}^{\text{raw}} = k_{pV} e_{vq} + k_{iV} \xi_{Vq}$, $[i_{d,\text{ref}}, i_{q,\text{ref}}] = \Pi_I(\cdot; I_{\max})$ และคำสั่ง

ชั้นใน v_{cd}, v_{cq} เหมือนกิ่ง GFL แต่เปลี่ยน $\omega \to \omega_{\text{VSG}}$ สเตต GFM ทั้งเจ็ดตัวเปลี่ยนแปลงทีละบรรทัดตามลำดับดัชนี

$$\dot{\delta}_{\text{VSG}} = \omega_b(\omega_{\text{VSG}} - 1), \quad \text{(10) มุม VSG} \tag{33}$$

$$M\,\dot{\omega}_{\text{VSG}} = \kappa u_1 - P_{\text{inv}} - D_v(\omega_{\text{VSG}} - 1), \quad \text{(11) สมการแกว่ง VSG} \tag{34}$$

$$\tau_E\,\dot{E} = k_Q(\kappa u_2 - Q_{\text{inv}}) - k_E(E - E_{\text{ref}}), \quad \text{(12) สเตตแรงดันวงรอบ } Q\text{–}V \tag{35}$$

$$\dot{\xi}_{Vd} = \mathcal{H}(e_{vd},\, k_{iV},\, r_{i,d},\, \text{sat}), \quad \text{(13) ตัวอินทิเกรตแรงดันแกน } d \tag{36}$$

$$\dot{\xi}_{Vq} = \mathcal{H}(e_{vq},\, k_{iV},\, r_{i,q},\, \text{sat}), \quad \text{(14) ตัวอินทิเกรตแรงดันแกน } q \tag{37}$$

$$\dot{\xi}_{Id} = i_{d,\text{ref}} - i_d, \quad \text{(15) ตัวอินทิเกรตกระแสแกน } d \tag{38}$$

$$\dot{\xi}_{Iq} = i_{q,\text{ref}} - i_q, \quad \text{(16) ตัวอินทิเกรตกระแสแกน } q \tag{39}$$

พิสูจน์ทีละสเตต (10)–(11) คือ VSG: สมการการแกว่งให้คอนเวอร์เตอร์มีมุม *ของตัวเอง* จากสมดุลกำลังจริง $M\dot{\omega}_{\text{VSG}} = \kappa u_1 - P_{\text{inv}} - D_v(\omega_{\text{VSG}} - 1)$ ดังนั้นที่จุดสมดุลจะได้ $\omega_{\text{VSG}} = 1$ และ $P_{\text{inv}} = \kappa u_1$ เพราะมุมถูกสร้างขึ้น ภายในเอง กิ่งนี้จึง*ไม่มี PLL* และสามารถจ่ายไฟให้เครือข่ายที่ไม่มีแหล่งอ้างอิง ได้ (12) คือวงรอบ Q–V ซึ่งสเตต E *คือ*ค่าอ้างอิงของวงรอบแรงดันเอง ($v_{d,\text{ref}} = E$): ที่จุดสมดุล $E = E_{\text{ref}} + (k_Q/k_E)(\kappa u_2 - Q_{\text{inv}})$ ซึ่งเป็นความชัน (droop) ระหว่างค่าสั่งกำลัง รีแอกทีฟกับแรงดันที่สร้างขึ้น จุดที่ต้องระวังคือพจน์ $-k_E(E - E_{\text{ref}})$ ต้องอ้างกับ E_{ref} ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากภายนอกตามกรณีศึกษา ไม่ใช่ขนาด แรงดันที่วัดได้ $|V|$ เพราะถ้าใช้ค่าที่วัดได้ พจน์คืนแรงดันจะหายไปที่จุดสมดุลและ เปลี่ยนพฤติกรรมสัญญาณขนาดเล็กของทั้งวงรอบ (13)–(14) คือตัวควบคุม PI ของแรงดันที่ ผลัก $v_d \to E$ และ $v_q \to 0$ (ทำให้แรงดันที่ขั้วเรียงตัวกับมุม VSG ที่ขนาด E) (15)–(16) คือ PI กระแสชั้นใน ตัวกันการอิ่มตัวสะสม $\mathcal{H}$ ในกิ่งนี้ย้ายไปอยู่ที่ ตัวอินทิเกรตของวงรอบ*แรงดัน* เพราะวงรอบแรงดันคือชั้นที่ผลิตค่าอ้างอิงกระแสที่ถูกจำกัด

ข้อสรุปเชิงกายภาพของกิ่งนี้ GFM เป็น*แหล่งแรงดัน* จึงเป็นเหตุผลว่าทำไม เกตกันการสูญเสียแหล่งอ้างอิงจึงยก IBR ขึ้นเป็น GFM ทันทีที่ SG slack หลุดออกไป เมื่อเปรียบเทียบสองกิ่ง จะเห็นความแตกต่างเชิงหลักการชัดเจน: GFL *ถาม*กริดว่ามุม อยู่ที่ไหนแล้วจ่ายกระแสตาม ส่วน GFM *บอก*กริดว่ามุมและแรงดันควรเป็นเท่าไร

5.5 การถ่ายโอนโหมดที่มีเกตความต่อเนื่องของกระแสกำกับ

เมื่อตัวกำกับเปลี่ยนโหมดของ IBR สเตตของตัวควบคุมโหมดใหม่จะ*ไม่*ถูกอินทิเกรตต่อ จากค่าเดิม แต่ถูก*ตั้งค่าเริ่มต้นใหม่*ที่จุดทำงานปัจจุบันของขั้ว เพื่อให้กระแส ที่อัดเข้าเครือข่ายไม่กระโดด ให้สเตตก่อนสลับ x^- อัดกระแส $I^- = I(x^-, V)$ โดย $S = V\overline{I^-}$, $P = \Re S$, $Q = \Im S$ การถ่ายโอน $x^- \mapsto x^+$ คือ

$$x^+_{\text{pl}} = x^-_{\text{pl}} \ (\text{ยก } i_d, i_q, V_{dc} \text{ มาทั้งชุด}), \qquad x^+_{\text{ctrl}} = \text{equilibrium_initialize}(V, P, Q), \tag{40}$$

พร้อมการยกค่าความถี่ข้ามโหมดหนึ่งค่าซึ่งมีความหมายเชิงกายภาพ: ขา GFL$\to$GFM กำหนด $\omega_{\text{VSG}} := \omega_{\text{PLL}}$ และขา GFM$\to$GFL กำหนดตัวอินทิเกรตของ PLL เป็น $\xi_{\text{PLL}} := \omega_b(\omega_{\text{VSG}} - 1)/k_{i,\text{PLL}}$ จากนั้นการถ่ายโอนจะถูก*ตรวจด้วยเกต*: กระแสหลังสลับ $I^+ = I(x^+, V)$ ต้อง สอดคล้องเงื่อนไข

$$\left|I^+ - I^-\right| \le \varepsilon_{\text{tol}} = 10^{-10}, \tag{41}$$

มิฉะนั้นขั้นเวลานั้นถูกปฏิเสธแบบ fail-closed

อ่านเงื่อนไขนี้อย่างไร สมการ (41) คือหลักประกันการถ่ายโอน แบบไร้กระตุก (bumpless transfer): โหมดอาจเปลี่ยนแบบไม่ต่อเนื่องใน*ระดับ พารามิเตอร์*ของตัวควบคุม แต่กระแสที่เครือข่ายมองเห็นต้องต่อเนื่อง เหตุผลที่ต้องบังคับ ที่กระแสไม่ใช่ที่สเตตคือ เครือข่ายไม่รู้จักสเตตภายในของอินเวอร์เตอร์ สิ่งที่เครือข่าย รับรู้คือกระแสตามสมการ (1) เท่านั้น ค่าขอบ 10^{-10} เข้มกว่าค่าความ คลาดเคลื่อนของตัวแก้ (10^{-8}) ประมาณสองอันดับ จึงเป็นการยืนยันว่าความต่อเนื่อง มาจากการออกแบบแผนที่ถ่ายโอน ไม่ใช่มาจากความหยาบของเกณฑ์การลู่เข้า

6 สูตรโดเมนเวลาแบบสลับโหมด

ระบบรวมถูกเดินหน้าในเวลาด้วยขั้นอิมพลิซิตแบบประกบกัน*ชุดเดียว*ที่ตัวขับแบบ ธรรมดาและแบบไฮบริดใช้ร่วมกัน หัวข้อนี้ตอบคำถามสามข้อเรียงกัน เพราะสามข้อนี้คือสิ่งที่ ทำให้ปัญหายากกว่าการอินทิเกรตเครื่องจักรตัวเดียว: (i) สมการเชิงอนุพันธ์ของแต่ละ อุปกรณ์*ไม่เหมือนกัน* และแม้แต่อุปกรณ์เดียวกันก็ไม่เหมือนกันเมื่อข้ามการเปลี่ยน โหมด (§6.1); (ii) แต่สมการเหล่านั้นถูกแก้*ไปพร้อมกัน*ในระบบ เดียวต่อหนึ่งขั้นเวลา โดยแยกส่วนเชิงอนุพันธ์ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบอิมพลิซิตแล้ว ต่อท้ายด้วยกฎของเครือข่าย (§6.2); และ (iii) ระบบนั้นไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องปิดแต่ละขั้นด้วยการวนซ้ำแบบนิวตันที่มีการหน่วง (§6.3) จากนั้นตามด้วยรายละเอียดเฉพาะของงานนี้อีกสองเรื่อง คือพิกัดที่ถูกตรึง (§6.4) และการเปลี่ยนโหมดที่แทนการอินทิเกรตด้วยการกำหนดค่าโดยตรง (§6.5)

6.1 เหตุใดสมการเชิงอนุพันธ์ของแต่ละอุปกรณ์จึงไม่เหมือนกัน

อุปกรณ์แต่ละตัวเป็นเจ้าของแบบจำลองเชิงอนุพันธ์ที่ต่างกัน ด้านขวามือของระบบจึงเป็น แบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous) โดยโครงสร้าง:

- **SG** เป็นไปตามสมการ EMF6 อันดับหกในหัวข้อ 4 (คู่สมการ การแกว่ง ฟลักซ์ชั่วครู่ และฟลักซ์ชั่วครู่ย่อย) โดยมีห้าตัวที่ถูกอินทิเกรต เพราะ E'_d ถูกตรึงไว้ที่ลิมิตเอกฐาน (ชุดแอ็กทีฟ $[\,1, 2, 3, 5, 6\,]$);
- **IBR ที่อยู่ในโหมด GFL** อินทิเกรตภาคกำลังร่วมบวกบล็อกตัวควบคุมที่มี PLL — รวม 10 สเตต, $\mathcal{A}_{\text{GFL}} = \{1{:}9,\ 17\}$ จาก (22);
- **IBR ที่อยู่ในโหมด GFM** อินทิเกรตภาคกำลังชุดเดิมบวกตัวควบคุมเครื่อง ซิงโครนัสเสมือน (ไม่มี PLL) — รวม 11 สเตต, $\mathcal{A}_{\text{GFM}} = \{1{:}3,\ 10{:}16,\ 17\}$;
- **อุปกรณ์ที่ถูกตัดออก** ไม่อินทิเกรตสเตตใดเลย ($\mathcal{A}_{\text{tripped}} = \varnothing$)

สเตตเต็มคือการต่อกันของบล็อกเหล่านี้ $x = [\,x_{\text{SG}};\ x_{\text{IBR}_1}; \ldots ; x_{\text{IBR}_4}\,]$ และด้านขวา มือคือการต่อกันที่สอดคล้องกัน

$$\dot{x} \;=\; f(x, V) \;=\; \big[\, f_{\text{SG}}(x_{\text{SG}}, V)\,;\ f_{\text{IBR}_1}(x_{\text{IBR}_1}, V;\, m_1)\,;\ \ldots \,\big], \tag{42}$$

โดยแต่ละบล็อก f_{IBR_i} ขึ้นกับโหมดปัจจุบันของอินเวอร์เตอร์ตัวนั้น $m_i \in \{\text{GFL}, \text{GFM}, \text{tripped}\}$ และถูกเขียนโดยอุปกรณ์เอง ไม่มีสมการเชิงอนุพันธ์ชุดเดียวที่ทุกอุปกรณ์ใช้ร่วมกัน การประกบระหว่างอุปกรณ์เกิดขึ้น *ผ่านแรงดันที่ขั้ว* V ซึ่งทุกบล็อกอ่านค่าเดียวกันเท่านั้น

6.2 หนึ่งระบบ DAE ประกบกัน หนึ่งขั้นสี่เหลี่ยมคางหมูแบบอิมพลิซิต

สมการเชิงอนุพันธ์วิวิธพันธุ์ (42) ถูกประกบกับกฎ KCL ของ เครือข่าย (1) เป็นระบบเชิงอนุพันธ์–พีชคณิตรวม

$$\dot{x} = f(x, V), \qquad 0 = g(x, V) = Y_{\text{net}} V - I_{\text{bus}}(x, V). \tag{43}$$

ระบบนี้ถูกเดินหน้าจาก (x_0, V_0) ไปสู่ (x_1, V_1) ด้วยขั้นขนาด h โดยแยกส่วน แถวเชิงอนุพันธ์ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบอิมพลิซิต และคงแถวพีชคณิตไว้ตรงตัว ให้ $f_0 = f(x_0, V_0)$, $f_1 = f(x_1, V_1)$ และชุดแอ็กทีฟ $\mathcal{A} \subseteq \{1, \ldots, n_x\}$ (คือยูเนียนของชุดแอ็กทีฟรายอุปกรณ์ข้างต้น) ขั้นเวลานั้นแก้ระบบ

$$\underbrace{\big[x_1 - x_0 - \tfrac{h}{2}(f_0 + f_1)\big]_{\mathcal{A}}}_{\text{แถวสี่เหลี่ยมคางหมูของสเตตแอ็กทีฟ}} = 0, \qquad \underbrace{g(x_1, V_1) = 0}_{\text{แถว KCL ทุกแถว}}. \tag{44}$$

อ่านสมการนี้อย่างไร เพราะ f_1 และ g ถูกประเมินที่สเตตปลายขั้นซึ่ง *ยังไม่ทราบค่า* ระบบนี้จึงเป็นระบบ*อิมพลิซิต* (ไม่เชิงเส้นและประกบกัน) ไม่ใช่การอัปเดตแบบเอกซ์พลิซิต ผลที่สำคัญคือ สเตตของอุปกรณ์ทุกตัวและแรงดันของบัสทุก บัสเป็นตัวไม่รู้ค่าของระบบ*เดียวกัน* เครื่องจักรและอินเวอร์เตอร์ทั้งสี่จึงถูก แก้ไปพร้อมกัน ไม่มีการวนซ้ำย่อยแยกทีละอุปกรณ์ (ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการ ประกบและอาจซ่อนการไม่ลู่เข้าไว้) สำหรับสเตตแอ็กทีฟตัวที่ i บล็อกแรกคือกฎสี่เหลี่ยม คางหมูตรงตัว $x_{1,i} = x_{0,i} + \frac{h}{2}(f_{0,i} + f_{1,i})$ ซึ่งเป็นวิธีอันดับสอง และรักษาสมบัติเชิงพลังงานได้ดีกว่าออยเลอร์อันดับหนึ่งที่ขั้นเวลาเท่ากัน

6.3 ขั้นเวลาถูกแก้อย่างไร: ระบบนิวตันแบบมีการหน่วง

เมื่อวางตัวไม่รู้ค่าซ้อนกันเป็น $z = [\,x_1|_{\mathcal{A}};\ V_1\,]$ สองบล็อก ของ (44) จะกลายเป็นเรซิดวลไม่เชิงเส้นชุดเดียว

$$r(z) = \begin{bmatrix} \big[x_1 - x_0 - \frac{h}{2}(f_0 + f_1)\big]_{\mathcal{A}} \\ g(x_1, V_1) \end{bmatrix} = 0, \tag{45}$$

ซึ่งถูกผลักให้เข้าสู่ศูนย์ด้วยการวนซ้ำแบบนิวตันที่มีการหน่วง ตัวแก้นิวตันนี้เป็น *เจ้าของเดียว*ที่ถูกใช้ซ้ำทั้งในการแก้จุดสมดุล การเดินขั้นสี่เหลี่ยมคางหมู และ การแก้ ณ จุดเหตุการณ์ ไม่มีอุปกรณ์ใดพาตัวแก้ของตัวเองมา หนึ่งรอบการวนซ้ำประกอบด้วย

1. สร้างจาโคเบียน $J = \partial r / \partial z$ ด้วย*ผลต่างจำกัดไปข้างหน้า* (คอลัมน์ที่ j คือ $[r(z + \varepsilon e_j) - r(z)]/\varepsilon$ โดย $\varepsilon = 3 \times 10^{-6}$) ไม่มีการประกอบจาโคเบียนเชิงวิเคราะห์ ข้อดีคืออุปกรณ์สามารถเปลี่ยนสมการของตนได้โดยไม่ต้องอนุพันธ์ด้วยมือ ซึ่งจำเป็น สำหรับระบบที่สมการเปลี่ยนไปตามโหมด;

2. ตรวจสภาพเงื่อนไข: ถ้า $\mathrm{rcond}(J) < \epsilon_{\text{mach}}$ ขั้นเวลานั้นถูกปฏิเสธแบบ fail-closed แทนที่จะฝืนแก้ระบบที่เกือบเอกฐาน;
3. หาทิศทางนิวตัน $\Delta z = -(J \setminus r)$ ด้วยตัวดำเนินการ backslash ของ MATLAB ที่ผ่านการตรวจสอบ — เป็นการแก้ระบบเชิงเส้น*เพียงที่เดียว* ในลูปนี้;
4. หน่วงทิศทางนั้นด้วยการค้นหาแบบถอยหลัง (backtracking line search): ลอง $z + \alpha\,\Delta z$ ที่ $\alpha = 1$ แล้วหาร α ด้วยสอง (ไม่เกิน 20 ครั้ง) จนกระทั่ง $\|r\|_\infty$ ลดลงอย่างเคร่งครัด ถ้าไม่มีค่า α ใดทำให้เรซิดวลลดลง ขั้นเวลานั้นล้มเหลวแบบ fail-closed ที่ค่าซ้ำล่าสุดที่ยอมรับได้

การวนซ้ำถือว่าลู่เข้าเมื่อ $\|r(z)\|_\infty < \mathrm{tol} = 10^{-8}$ และวนซ้ำ ได้ไม่เกิน 50 รอบ ไม่มีสิ่งใดในลูปนี้ถูกปรับแต่งให้เข้ากับกรณีศึกษา: ค่าความ คลาดเคลื่อน ขนาดผลต่างจำกัด เกตสภาพเงื่อนไข และสัญญาของการค้นหาแบบถอยหลัง เป็นค่าคงที่ ของตัวแก้ทั้งหมด

เหตุใดต้องมีการหน่วง นิวตันแบบเต็มขั้น ($\alpha = 1$ เสมอ) ลู่เข้าเร็วเมื่ออยู่ ใกล้คำตอบ แต่อาจกระโดดข้ามและแยกออกได้เมื่อจุดเริ่มต้นอยู่ไกล เช่นในขั้นเวลาที่คร่อม การเกิดฟอลต์ การค้นหาแบบถอยหลังทำให้ทุกรอบต้องลดเรซิดวลลงจริง จึงได้ความทนทานเพิ่มขึ้น โดยไม่แลกกับการเปลี่ยนสมการหรือผ่อนเกณฑ์การยอมรับ

6.4 พิกัดที่ถูกตรึง: การฉายด้วย Π

ดัชนีทุกตัวที่*ไม่ได้*อยู่ใน $\mathcal{A}$ — คือชุดที่ถูกตรึง $\mathcal{F} = \{1, \ldots, n_x\} \setminus \mathcal{A}$ — จะถูกถอดออกจากระบบนิวตันและ คงค่าไว้แบบตรงตัว

$$x_{1,i} = x_{0,i} \quad \text{สำหรับทุก } i \in \mathcal{F}. \tag{46}$$

ตัวแก้เริ่มจาก $x_1 \leftarrow x_0$ และไม่เคยเขียนทับแถวที่ถูกตรึง จากนั้นมีการ ตรวจการเลื่อนไถล (drift check) ยืนยันซ้ำว่า $x_1|_{\mathcal{F}} = x_0|_{\mathcal{F}}$ หลังจบขั้นเวลา การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของพิกัดที่ถูกตรึงถือเป็นข้อผิดพลาดร้ายแรง (hard error) มีของสองประเภทที่อยู่ใน $\mathcal{F}$ คือ ฟลักซ์ลิมิตเอกฐาน E'_d ของ หัวข้อ 4.3 (ถูกตรึงตลอดการรัน) และบล็อกตัวควบคุมทั้งก้อนที่ IBR ตัวนั้น *ไม่ได้*ใช้อยู่ในขณะนั้น (ถูกตรึงนานเท่าที่โหมดนั้นยังไม่ทำงาน) แผนที่ Π ที่เลือก $\mathcal{A}$ เป็นผู้มีอำนาจเดียวกันในทุกจุดที่เรียกใช้ (`ts_dynamic_state_indices`) ดังนั้นรูป $n_x(t)$ ในหัวข้อถัดไปจึงไม่มีทาง ขัดแย้งกับสิ่งที่ตัวอินทิเกรตแก้จริง

6.5 การสลับโหมด: จากการอินทิเกรตเป็นการกำหนดค่า

การเปลี่ยนโหมดถูกจัดให้ลง*ตรงกับขอบขั้นเวลาพอดี* (ขั้นเวลาถูกแบ่งย่อยจนเวลา เหตุการณ์กลายเป็นจุดกริด) ณ ขอบนั้นสเตตไม่ได้ถูกเดินหน้าด้วย (44) แต่ถูกแทนด้วยการถ่ายโอนแบบไม่ต่อเนื่องของหัวข้อ 5.5

$$x_1 \;=\; \mathcal{T}(x_0, V) \quad \text{(การตั้งค่าเริ่มต้นใหม่) แทนที่จะเป็น } \; x_1 = x_0 + \tfrac{h}{2}(f_0 + f_1). \tag{47}$$

ที่ขอบของการเปลี่ยนโหมด พิกัดของตัวควบคุมกระโดดไปยังค่าที่ถ่ายโอนมา $\mathcal{T}(x_0, V)$ ซึ่งถูกเลือกให้ผ่านเกตความต่อเนื่องของ กระแส (41) แล้วการอินทิเกรตจะดำเนินต่อบนชุดแอ็กทีฟ*ชุดใหม่*ตั้งแต่ ขั้นเวลาถัดไป มีข้อสรุปสองข้อที่สำคัญต่อการอ่านผลของงานนี้:

- **การตัด SG ออก** *ไม่ใช่*การกำหนดค่าแบบนั้น SG ยังคงชุดแอ็กทีฟ เดิม $[\,1, 2, 3, 5, 6\,]$ วิถีของมันต่อเนื่องข้าม $t = 20$ s (คือการไหลตามแรง เฉื่อยในหัวข้อ 4) สิ่งที่เปลี่ยนคือกิ่งของด้านขวามือเท่านั้น (จากสเตเตอร์ที่ต่ออยู่ $\longrightarrow$ วงจรเปิด)
- **การเปลี่ยน GFL$\longrightarrow$GFM ของ IBR** ที่ $t = 20$ s *เป็น*การกำหนดค่า แบบนั้น มิติแอ็กทีฟของ IBR แต่ละตัวเปลี่ยนจาก $11 \rightarrow 12$ และสเตตตัวควบคุมถูก ตั้งค่าใหม่ตาม (40) ดังนั้นมิติพลวัตของระบบรวมเปลี่ยนเพราะ อินเวอร์เตอร์ ไม่ใช่เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

6.6 มิติของสเตตที่ถูกอินทิเกรตจริง และเรซิดวลรายขั้น

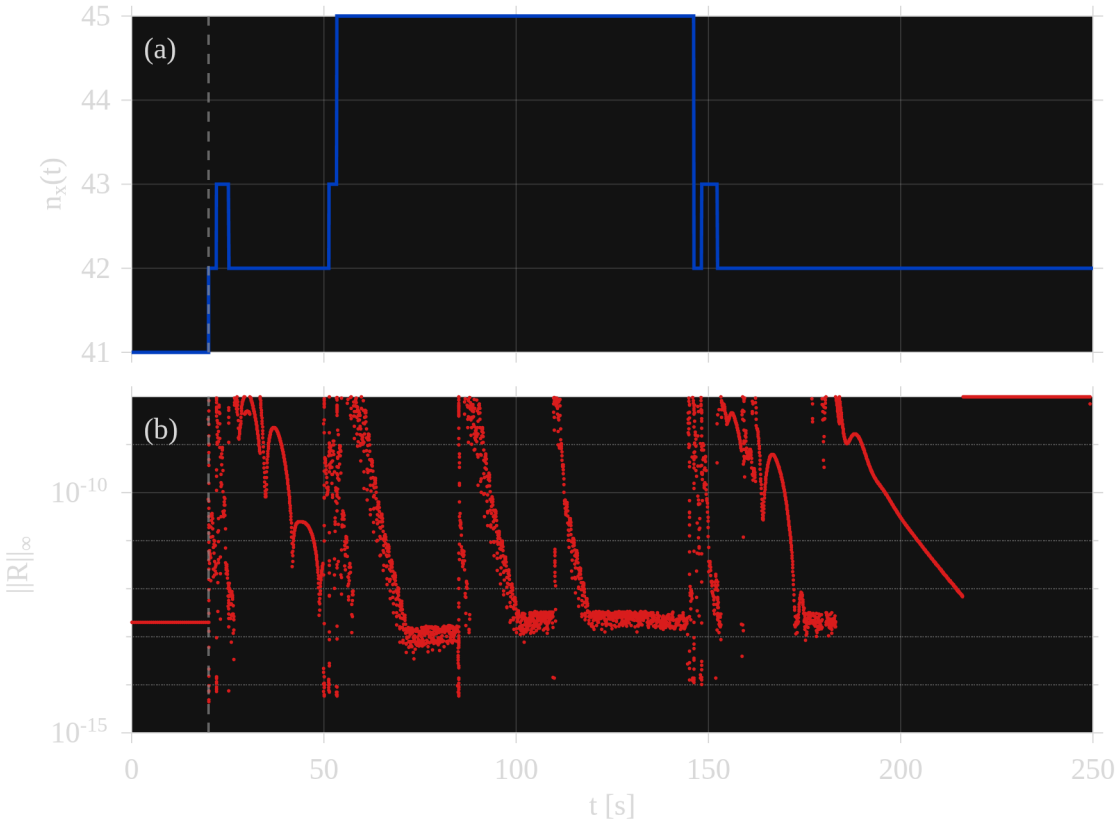
รูปที่ 4 แสดงสองสิ่งที่ตรวจสอบซึ่งกันและกัน แผงบน (a) คือจำนวนสเตตเชิง อนุพันธ์ที่ระบบรวมอินทิเกรตจริง $n_x(t)$ วาดเป็นเส้นขั้นบันได และแผงล่าง (b) คือ เรซิดวลของทุกขั้นเวลาที่ตัวแก้ยอมรับ $\|R\|_\infty$ บนสเกลลอการิทึม เส้นประแนวตั้งสีเทาในทั้งสองแผงคือเวลาที่ SG ถูกตัดออก

จากชุดแอ็กทีฟใน (22) และชุดแอ็กทีฟห้าตัวของ SG มิติรวมต้องเป็นไปตาม เอกลักษณ์การนับ

$$n_x(t) = \underbrace{5}_{\text{SG (ตรึง } E'_d)} + \sum_{i=1}^{4} \begin{cases} 9, & \text{IBR}_i \text{ อยู่ในโหมด GFL}, \\ 10, & \text{IBR}_i \text{ อยู่ในโหมด GFM}, \\ 0, & \text{IBR}_i \text{ ถูกตัดออก}, \end{cases} \tag{48}$$

ดังนั้นถ้า IBR ทั้งสี่เป็น GFL ค่าที่คาดคือ $5 + 4 \times 9 = 41$ และถ้าทั้งสี่เป็น GFM ค่าที่คาดคือ $5 + 4 \times 10 = 45$ ทุกครั้งที่มี IBR หนึ่งตัวสลับโหมด เส้นขั้นบันไดจะขยับ หนึ่งหน่วยเท่านั้น ประเด็นสำคัญคือรูปนี้ไม่ได้ฝังตัวเลขไว้ล่วงหน้า: ตัวสร้างรูปเรียก แผนที่สเตตของอุปกรณ์แต่ละตัว ณ ทุกจุดตัวอย่างที่ยอมรับ แล้วหักดัชนีที่ถูกตรึงออก จึง เป็นการอ่านค่าเดียวกับที่ตัวอินทิเกรตใช้จริง และถ้าอุปกรณ์ใดไม่สามารถรายงานแผนที่ของ ตนได้ ตัวสร้างรูปจะหยุดแบบ fail-closed แทนการเดาจำนวน

วิธีอ่านแผงล่าง เรซิดวลของทุกขั้นที่ยอมรับต้องอยู่ใต้เกณฑ์ tol $= 10^{-8}$ ตามหัวข้อ 6.3 เสมอ เรซิดวลที่ใหญ่ที่สุดของการ รันนี้คือ 9.9721×10^{-9} ซึ่งยังต่ำกว่าเกณฑ์ ค่าที่เห็นกระจายตัวช่วงฟอลต์และช่วง สลับโหมดไม่ใช่การละเมิดเกณฑ์ แต่คือหลักฐานว่าขั้นเวลาช่วงนั้นถูกแบ่งย่อยลงจนกระทั่ง ผ่านเกณฑ์เดิมได้ (ระดับการแบ่งย่อยลึกที่สุดของการรันนี้คือ 0 ชั้น และมีขั้นทดลองที่ถูกปฏิเสธเพราะออกนอกโดเมน 1027 ครั้ง)



รูปที่ 4: (a) จำนวนสเตตเชิงอนุพันธ์ที่ระบบรวมอินทิเกรตจริง $n_x(t)$ วาดเป็นเส้นขั้น บันได อ่านจากแผนที่สเตตของอุปกรณ์เองที่ทุกจุดตัวอย่างที่ยอมรับ (b) เรซิดวลของแต่ละ ขั้นเวลาที่ยอมรับ $||R||_\infty$ บนสเกลลอการิทึม เส้นประแนวตั้งสีเทาคือเวลา ที่ SG ถูกตัดออก ทุกจุดเป็นค่าดิบที่ตัวแก้ยอมรับจากวิถี 250 วินาทีของแขนสลับอัตโนมัติ

7 ผลการไหลของกำลัง

ตารางที่ 4 คือผลการไหลของกำลังที่แก้ได้ในสภาวะ SG ออนไลน์ (เป็นจุด ทำงานอ้างอิงที่ใช้ดึงค่า $V_i^\star$ ในสมการ (2)) และ ตารางที่ 5 คือกำลังไหลในกิ่งสายและกำลังสูญเสียที่จุดทำงานเดียวกัน บัสอ้างอิงจ่าย $P_g = 1.3319$ p.u. และ $Q_g = -0.1957$ p.u. ส่วนบัส IBR ทั้งสี่ (2, 3, 6 และ 8) อัดกำลังตามค่าสั่งของตน ขณะที่บัสโหลดทุกบัสได้รับ P_L, Q_L ครบตามต้องการ

วิธีอ่านสองตารางนี้ สามสิ่งที่ควรชี้ให้ผู้ฟังเห็น หนึ่ง คอลัมน์ $|V|$ ของ ตารางที่ 4 คือที่มาของ $V_i^\star$ รายบัส สังเกตว่าบัส 6 และบัส 8 มี แรงดันสูงกว่า 1 p.u. ในสภาวะปกติ จึงยืนยันเหตุผลที่ดัชนี J_V ต้องอ้างค่ารายบัส สอง คอลัมน์ Q_{min}, Q_{max} คือขอบเขตกำลังรีแอกทีฟที่ถูกลงทะเบียนและถูกบังคับใช้ จริงในการแก้ (ไม่ใช่ $\pm\infty$) สาม คอลัมน์ P_{loss}, Q_{loss} ในตาราง ที่ 5 คือกำลังสูญเสียในกิ่งสาย ซึ่งค่า Q_{loss} ที่เป็นลบหมายถึงกิ่ง นั้นจ่ายกำลังรีแอกทีฟสุทธิจากตัวเก็บประจุขนานของสาย ไม่ใช่ความผิดพลาดของเครื่องหมาย

ตารางที่ 4: ผลการไหลของกำลังรายบัสที่จุดทำงาน SG ออนไลน์ (ค่าต่อหน่วยบนฐานระบบ มุมเป็นองศา)

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	–	–	–

ตารางที่ 5: กำลังไหลในกิ่งสายและกำลังสูญเสียที่จุดทำงาน SG ออนไลน์

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

8 สเปกตรัมสัญญาณขนาดเล็ก

ตารางโมดัลด้านล่างแสดงค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) ของสัญญาณขนาดเล็กที่การจัดรูป หลังการรบกวนแบบตัวแทนหนึ่งกรณี (มี IBR หนึ่งตัวเป็น GFM และสามตัวเป็น GFL) โดยแสดง ลำดับที่ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าลักษณะเฉพาะ λ แยกเป็นคนละคอลัมน์ ความถี่โมดัล f อัตราการหน่วง ζ และรายการมีส่วนร่วมสามอันดับแรกพร้อมค่า ที่ปรับบรรทัดฐานแล้วในวงเล็บ คู่สังยุค (conjugate pair) พิมพ์เพียงแถวเดียว ส่วนจินตภาพจึงเขียนด้วย $\pm$ และหมายถึงทั้งสองสมาชิกของคู่ ขณะที่โมดที่เป็นจำนวน จริงล้วนพิมพ์ 0 ที่คอลัมน์นั้นและ $\zeta = 1$ ค่าในวงเล็บคือสิ่งที่ทำให้คอลัมน์ สุดท้ายอ่านเป็นหลักฐานได้: สามรายการที่ใกล้ 0.13 เท่า ๆ กันบอกว่าโมดนั้นเป็น ครอบครัวที่แชร์กัน ขณะที่รายการเดียว

ที่ 1.000 บอกว่าไม่มีสเตตอื่นขับพิกัดนั้นเลย ค่าการมีส่วนร่วมเป็นข้อมูลเชิงรายงานและไม่เข้าเกตใด ตารางนี้คือตารางที่ตัวสร้างผลิต ไว้เอง ไม่ใช่สำเนาที่พิมพ์เรียงใหม่ จึงเป็นตารางเดียวกับที่รายงานฉบับภาษาอังกฤษใช้ และตัวเลขตรงกันบิตต่อบิต

วิธีอ่านตารางโมดัล นิยามที่ใช้คือ $f_i = |\Im\lambda_i|/2\pi$ และ $\zeta_i = -\Re\lambda_i/|\lambda_i|$ ดังนั้นค่าลักษณะเฉพาะที่เป็นจำนวนจริงจะมี $f = 0$ และ $\zeta = 1$ ตามนิยาม ไม่ใช่เพราะถูกปรับแต่ง สิ่งที่ควรสังเกตเป็นกลุ่มคือ โมดที่มีความถี่สูงระดับร้อยเฮิรตซ์เป็นกลุ่มของกระแสตัวกรองและเครือข่าย รากจริงสี่ราก ที่อยู่เหนือ -100 s^{-1} ขึ้นมาเล็กน้อยคือครอบครัวของบัส DC ทั้งสี่ตัว และ โมดที่ช้าที่สุดคือกลุ่มตัวอินทิเกรตของวงรอบแรงดัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบของอัตราการหน่วง ในการจัดรูปนี้

โมดของบัส DC เป็นการตรวจสอบแบบจำลอง ไม่ใช่ข้อสังเกตที่ได้มาฟรี คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวให้พิกัดบัส DC มาหนึ่งตัว และด้วยแหล่งจ่าย DC ไม่อุดมคติใน หัวข้อ 5 พิกัดนั้นเป็นสเตตที่มีชีวิตซึ่งผูกกับสเตตด้าน AC ผ่านกำลังของ คอนเวอร์เตอร์ P_{ac} ค่าลักษณะเฉพาะของมันถูก*ทำนายไว้ก่อน*คำนวณสเปกตรัม โดย การเชิงเส้นแถว DC ขณะปิดชอปเปอร์ ซึ่งด้วย $C_{dc} = R_{dc} = 0.10$ ย่อลงเป็นข้อความที่ พิสูจน์เท็จได้ว่า $\lambda_{dc} = -(1/C)\big(1/R_{dc} - P_{ac}/V_{dc}^2\big) = -100 + 10\,P_{ac}/V_{dc}^2$ s^{-1} ดังนั้นแถว DC ทั้งสี่ต้องเป็นจำนวนจริง ต้องอยู่เหนือ -100 s^{-1} ขึ้นมาเล็กน้อย และต้อง*แยกจากกันและเรียง ตามกำลังที่คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวรับ* — ยิ่งบัสรับภาระมาก โมดยิ่งลบน้อยลง เพราะพจน์ ที่สองคือความต้านทานส่วนเพิ่มค่าลบของโหลดกำลังคงที่ ตารางเป็นไปตามทั้งสามข้อ: สี่แถว เป็นค่าที่แยกจากกันโดยมีแรงดันบัส DC เป็นสเตตเด่น และการผกผันความสัมพันธ์ข้างต้นคืนค่า กำลังรายคอนเวอร์เตอร์ในช่วง 0.3–0.9 pu ซึ่งเป็นภาระเดียวกับที่รูปโดเมนเวลา แสดงสำหรับอุปกรณ์เดียวกัน ไม่มีการปรับค่าใดเพื่อให้ได้ความสอดคล้องนี้ closure ถูก อนุมานก่อน แล้วจึงคำนวณสเปกตรัมทีหลัง

ทำไมค่าการมีส่วนร่วมของ DC ยังเป็น 1.000 และทำไมมันเป็นข้อเท็จจริง คนละเรื่องแล้ว รายงานฉบับก่อนหน้านี้พิมพ์สี่แถวที่ $\lambda = -10.000000$ เท่ากันทั้งสี่แถว แต่ละแถว มีค่าการมีส่วนร่วม 1.000 พอดีบนแรงดันบัส DC ที่นั่นมีคุณสมบัติสองอย่างถูกรวมปนกัน และมีเพียงอย่างเดียวที่เปลี่ยนไป

ค่าลักษณะเฉพาะที่*ซ้ำกัน*คือลายเซ็นของ closure อุดมคติ มันทำให้แถว DC ถูกแยก ออกโดยสมบูรณ์ ดังนั้น $-1/T_{dc}$ จึงเป็นค่าลักษณะเฉพาะที่มีพหุคูณเชิงพีชคณิตเท่าสี่ ไม่ว่าตัวแปลงจะทำอะไรอยู่ และ V_{dc} คงที่ตลอดวิถี สิ่งนั้นหายไปแล้ว แถว DC ทั้งสี่ เป็นเลขสี่ค่าที่ต่างกัน เรียงตามกำลังที่แต่ละลิงก์รับ ตรงตามที่สมการทำนาย และ V_{dc} ขยับเป็นพิสัยไม่กี่เปอร์เซ็นต์บนทุกแขน นั่นคือข้อเท็จจริงที่บอกว่าลิงก์มีชีวิต

ค่าการมีส่วนร่วม 1.000 *ไม่ใช่*หนึ่งในข้อเท็จจริงนั้น และไม่เคยเป็นหลักฐาน เกี่ยวกับ closure เลย มันเป็นผลของการที่การต่อกันเป็น*ทางเดียว* ซึ่งวัดได้และ วัดแล้ว: การรบกวน V_{dc} ไม่เปลี่ยนอนุพันธ์ของสเตตอื่นเลยแม้แต่ตัวเดียว

$$\max_{i \neq V_{dc}} \left| \frac{\partial f_i}{\partial V_{dc}} \right| = 0 \quad \text{พอดี ทั้งสองสาขา} \tag{49}$$

ขณะที่แถว DC อ่านสเตตด้าน AC จริง โดย $\max_j |\partial f_{V_{dc}}/\partial x_j| = 17.65$ จาโคเบียนของอุปกรณ์จึงเป็นบล็อก สามเหลี่ยมในการแบ่ง (AC, DC) ทำให้เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ*ขวา*ของโมด DC เป็นเวกเตอร์ หนึ่งหน่วยบนพิกัดนั้นพอดี และตัวประกอบการมีส่วนร่วม $p_{ki} = |\phi_{ik}\psi_{ki}|$ จึงกระจุกอยู่ที่นั่นในเชิงพีชคณิต ไม่ว่าแหล่งจ่าย DC จะเป็นแบบใด ผู้อ่านควรอ่าน 1.000 ในคอลัมน์นั้นว่า “ไม่มีสิ่งอื่นขับพิกัดนี้” ไม่ใช่ “พิกัดนี้ไม่ทำอะไรเลย”

ข้อจำกัดของแบบจำลองที่อยู่เบื้องหลังสมการ (49) การต่อกันทางเดียวเป็นคุณสมบัติของแบบจำลองนี้ ไม่ใช่ของตัวแปลงจริง วงรอบชั้นในสร้างคำสั่ง แรงดัน v_{cd}, v_{cq} จากความผิดพลาดของกระแสเพียงอย่างเดียว ไม่มีอะไรผูกคำสั่งนั้นกับ แรงดัน DC ที่มีให้ใช้สังเคราะห์ ตัวแปลงสองระดับจริงผลิตได้ราว $m\,V_{dc}/2$ ต่อเฟส ดังนั้นลิงก์ที่ตกจะตัดยอดคำสั่ง AC และการต่อกันจะกลายเป็นสองทาง สเตต DC จะปรากฏใน แถว AC ความเป็นบล็อกสามเหลี่ยมจะแตก และการมีส่วนร่วมของ DC จะกระจายออก การเพิ่มขีดจำกัด ดัชนีการมอดูเลตเป็นการเปลี่ยนสมการด้าน AC และไม่ได้ทำในงานนี้ จนกว่าจะทำ ลิงก์ DC ของ งานนี้ตอบสนองต่อด้าน AC ได้แต่ย้อนไปกระทำกับมันไม่ได้ และไม่มีข้ออ้างใดในรายงานนี้ ที่อาศัยความสามารถนั้น

No.	$\Re\lambda$ (s^{-1})	$\Im\lambda$ (s^{-1})	f (Hz)	ζ	Dominant participation: device:state (normalised)
1	-2075.371442	0	0	1	IBR6:i_d (0.333); IBR8:i_d (0.255); IBR3:i_d (0.222)
2	-1459.095967	0	0	1	IBR8:i_q (0.340); IBR8:i_d (0.285); IBR6:i_q (0.179)
3	-1408.957478	0	0	1	IBR3:i_d (0.397); IBR3:i_q (0.294); IBR6:i_q (0.124)
4†	-1288.036461	0	0	1	IBR6:i_q (0.292); IBR6:i_d (0.282); IBR3:i_q (0.193)
5	-1252.898506	0	0	1	IBR8:i_d (0.324); IBR8:i_q (0.279); IBR3:i_q (0.184)
6	-952.908217	± 403.267239	64.181975	0.920928	IBR2:i_q (0.491); IBR6:i_q (0.173); IBR3:i_q (0.153)
7	-900.503570	0	0	1	IBR2:i_d (0.784); IBR8:i_d (0.063); IBR6:i_d (0.062)

No.	$\Re\lambda$ (s^{-1})	$\Im\lambda$ (s^{-1})	f (Hz)	ζ	Dominant participation: device:state (normalised)
8	-249.267967	0	0	1	IBR2:ω_{VSG}^{GFM} (0.984); IBR2:E^{GFM} (0.011); IBR6:δ_{PLL}^{GFL} (0.002)
9	-159.268727	0	0	1	IBR2:E^{GFM} (0.974); IBR2:ω_{VSG}^{GFM} (0.015); IBR6:δ_{PLL}^{GFL} (0.003)
10†	-98.406155	± 98.380337	15.657717	0.707200	IBR2:I_{dc} (0.500); IBR2:V_{dc} (0.500); IBR2:E^{GFM} (0.000)
11†	-96.455579	± 96.325245	15.330639	0.707585	IBR8:V_{dc} (0.500); IBR8:I_{dc} (0.500); IBR2:ξ_{Id}^{GFM} (0.000)
12†	-96.346517	± 96.207876	15.311959	0.707616	IBR3:V_{dc} (0.500); IBR3:I_{dc} (0.500); IBR2:E^{GFM} (0.000)
13†	-95.555521	± 95.348575	15.175197	0.707873	IBR6:V_{dc} (0.500); IBR6:I_{dc} (0.500); IBR2:E^{GFM} (0.000)
14	-13.544228	± 0.055071	8.7648×10^{-3}	0.999992	IBR2:ξ_{Id}^{GFM} (0.288); IBR2:ξ_{Iq}^{GFM} (0.196); IBR6:ξ_{Iq}^{GFL} (0.167)
15	-13.507642	0	0	1	IBR2:ξ_{Id}^{GFM} (0.441); IBR2:ξ_{Iq}^{GFM} (0.272); IBR8:ξ_{Iq}^{GFL} (0.109)
16†	-13.492443	0	0	1	IBR8:ξ_{Id}^{GFL} (0.346); IBR8:ξ_{Iq}^{GFL} (0.331); IBR3:ξ_{Id}^{GFL} (0.154)
17	-13.488369	0	0	1	IBR6:ξ_{Iq}^{GFL} (0.300); IBR6:ξ_{Id}^{GFL} (0.279); IBR3:ξ_{Iq}^{GFL} (0.185)
18	-13.475757	0	0	1	IBR3:ξ_{Id}^{GFL} (0.323); IBR3:ξ_{Iq}^{GFL} (0.246); IBR6:ξ_{Iq}^{GFL} (0.175)
19	-13.471825	0	0	1	IBR8:ξ_{Iq}^{GFL} (0.372); IBR8:ξ_{Id}^{GFL} (0.315); IBR6:ξ_{Iq}^{GFL} (0.140)
20	-13.433124	0	0	1	IBR6:ξ_{Id}^{GFL} (0.319); IBR8:ξ_{Id}^{GFL} (0.238); IBR3:ξ_{Id}^{GFL} (0.220)
21	-2.623074	0	0	1	IBR2:ξ_{Vq}^{GFM} (0.441); IBR2:ξ_{Vd}^{GFM} (0.239); IBR8:δ_{PLL}^{GFL} (0.112)
22†	-1.843600	0	0	1	IBR8:ξ_{P}^{GFL} (0.236); IBR6:ξ_{P}^{GFL} (0.217); IBR8:ξ_{Q}^{GFL} (0.130)
23	-1.491476	0	0	1	IBR8:ξ_{Q}^{GFL} (0.310); IBR6:ξ_{Q}^{GFL} (0.237); IBR8:ξ_{P}^{GFL} (0.219)
24	-1.434890	0	0	1	IBR3:ξ_{P}^{GFL} (0.500); IBR3:ξ_{Q}^{GFL} (0.346); IBR6:ξ_{Q}^{GFL} (0.038)
25	-1.364330	0	0	1	IBR6:ξ_{P}^{GFL} (0.344); IBR6:ξ_{Q}^{GFL} (0.306); IBR3:ξ_{Q}^{GFL} (0.104)
26	-1.326920	0	0	1	IBR3:ξ_{Q}^{GFL} (0.307); IBR8:ξ_{P}^{GFL} (0.259); IBR3:ξ_{P}^{GFL} (0.225)
27	-1.185526	± 2.980707	0.474394	0.369574	IBR2:ξ_{Vd}^{GFM} (0.244); IBR2:ξ_{Vq}^{GFM} (0.180); IBR6:δ_{PLL}^{GFL} (0.176)
28†	-0.588912	± 2.171749	0.345645	0.261717	IBR6:δ_{PLL}^{GFL} (0.250); IBR6:ξ_{PLL}^{GFL} (0.241); IBR8:ξ_{PLL}^{GFL} (0.227)
29†	-0.566771	± 2.132137	0.339340	0.256901	IBR3:δ_{PLL}^{GFL} (0.334); IBR3:ξ_{PLL}^{GFL} (0.321); IBR8:ξ_{PLL}^{GFL} (0.139)
30	-0.328014	± 0.448860	0.071438	0.590017	IBR2:ξ_{Vd}^{GFM} (0.242); IBR6:ξ_{PLL}^{GFL} (0.141); IBR6:ξ_{Q}^{GFL} (0.108)

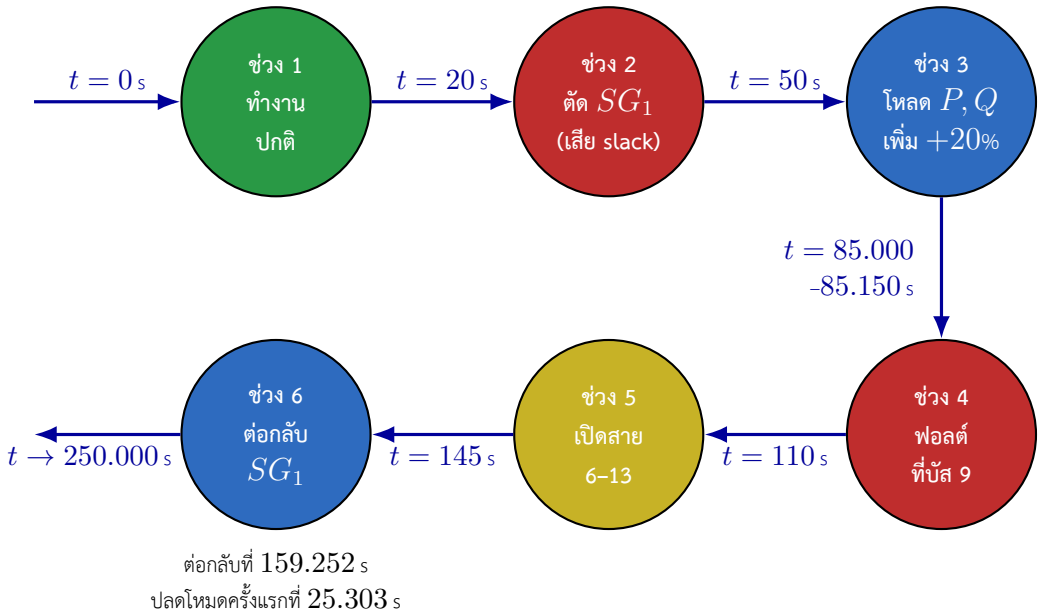
† 9 of the 30 rows carry this mark. Their two leading participations differ by less than 0.02, the resolution of the printed factors, so the first entry is not a sole attribution there and the three entries should be read together.

สเปกตรัมทั้งหมดอยู่ในระนาบครึ่งซ้ายที่การจัดรูปนี้ ข้อความนี้เป็นข้อความเกี่ยวกับ สัญญาณขนาดเล็ก ณ *จุดเชิงเส้นหนึ่ง*จุดเท่านั้น ไม่ใช่ และต้องไม่ถูกอ่านว่าเป็น ใบรับรองเสถียรภาพของวิถีแบบสลับโหมดทั้งเส้น เหตุผลคือการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก สมมติว่าการรบกวนเล็กพอที่การ

ประมาณเชิงเส้นยังใช้ได้ ขณะที่ฟอลต์และการสลับโหมดใน งานนี้เป็นการรบกวนขนาดใหญ่โดยธรรมชาติ ทั้งสองเครื่องมือจึงเสริมกัน ไม่ทดแทนกัน

9 ผลตอบสนองชั่วครู่: การจำลองในโดเมนเวลา

รูปที่ 5 วางไทม์ไลน์หกช่วงไว้เหนือกราฟผลลัพธ์ทั้งหมดของหัวข้อนี้ เพื่อให้เทียบเวลาเหตุการณ์กับเส้นกราฟได้โดยตรง



รูปที่ 5: ลำดับเหตุการณ์รบกวนหกช่วง สีเขียว: ยังไม่ถูกรบกวน สีแดง: เหตุการณ์ที่ ทำให้สูญเสียแหล่งจ่ายหรือทำให้บัสเกิดฟอลต์ สีเหลือง: การเปลี่ยนโครงสร้างเครือข่าย สีน้ำเงิน: การกระทำเพื่อฟื้นฟูระบบ เวลาที่ตั้งไว้ล่วงหน้า ($0, 20, 50, 85.000$–$85.150, 110, 145$ s) เป็นค่าจากกรณีศึกษา ส่วนเวลาต่อกลับและ เวลาปลดโหมดครั้งแรกอ่านจากบันทึกเหตุการณ์ที่ตัวแก้ยอมรับ

ตารางที่ 7 รวมตัวเลขสรุปของการรันที่ใช้วาดกราฟทุกรูป ในหัวข้อนี้ ตัวเลขทั้งหมดเป็นค่าที่ตัวแก้ยอมรับจากวิถี 250.000 วินาทีของแขน สลับโหมดอัตโนมัติ และถูกอ่านผ่านมาโครที่ตัวสร้างเขียนให้ ไม่มีตัวเลขใดพิมพ์ตรงลงใน เนื้อความ ค่าสุดขีดของแรงดันและความถี่ในตารางนี้เป็น*ผลที่รายงาน* ไม่ใช่เกณฑ์ยอมรับ และไม่ถูกนำไปปรับแบบจำลองย้อนกลับ

ตารางที่ 7: ตัวเลขสรุปของการรัน 250.000 วินาทีที่ใช้วาดกราฟในหัวข้อนี้

รายการ	ค่า	หมายเหตุ
เวลาสุดท้ายที่ยอมรับได้	250.000 s	ขอบฟ้าเต็มของการรัน ไม่มีการตัดท้าย
สถานะการต่อกลับ	SUCCESS	อ่านจากบันทึกเหตุการณ์
ช่วงแรงดันทุกบัสที่พบ	0.036855–1.523199 p.u.	ค่าสุดขีดชั่วครู่ ไม่ใช่พิกัดใช้งาน
ช่วงความถี่ที่พบ	58.839081–61.138547 Hz	ค่าสุดขีดชั่วครู่ระหว่างฟอลต์และการสลับโหมด
ความถี่จุดศูนย์กลางความเฉื่อยปลายทาง	60.000001 Hz	ที่ $t = 250.000$ s
ช่วงแรงดันปลายทาง	0.9667–1.0575 p.u.	ที่ $t = 250.000$ s
เรซิดวลสูงสุดของขั้นที่ยอมรับ	9.9721×10^{-9}	ต่ำกว่าเกณฑ์ 10^{-8} ทุกขั้น
ระดับการแบ่งขั้นเวลาย่อยที่ลึกสุด	0 ชั้น	กลไกแบ่งครึ่งแบบทวิภาค
ขั้นทดลองที่ถูกปฏิเสธเพราะออกนอกโดเมน	1027 ครั้ง	ไม่มีการผ่อนเกณฑ์เพื่อให้ผ่าน
ขั้นเวลาที่ตัวควบคุมปฏิเสธ	161 ครั้ง	ตัวเดินขั้นแบบ adaptive
จำนวนจุดตัวอย่างที่ยอมรับ	3679	
เวลาที่ SG ต่อกลับสำเร็จ	159.252 s	อ่านจากบันทึกเหตุการณ์
ส่วนต่างขณะปิดเบรกเกอร์	$\Delta V = 0.008785$ p.u. $\Delta f = 1.8805 \times 10^{-8}$ pu $\Delta\theta = 5.015017^\circ$	ผ่านกรอบการซิงโครไนซ์เดิม
เวลาที่เลื่อนโหมดขึ้น (4 ครั้ง)	22.089, 51.340, 53.379, 148.281 s	แต่ละครั้งผ่านใบรับรองการเปลี่ยนสภาพ
เวลาที่ปลดโหมด (3 ครั้ง)	25.303, 146.278, 152.402 s	ปลดได้ครั้งละหนึ่งตัว
จำนวน GFM สูงสุดที่ถือพร้อมกัน	4 ตัว	ไปถึงแบบเป็นขั้น ไม่ใช่กระโดด
การคืนโหมดหลังต่อกลับ (1 ครั้ง)	ที่ 173.1271 s	หน่วย grid-forming สุดท้ายส่งคืน
สถานะการเลือกชุดใหม่หลังต่อกลับ	SUCCESS	ผ่านการตรวจกับตาราง SG-online

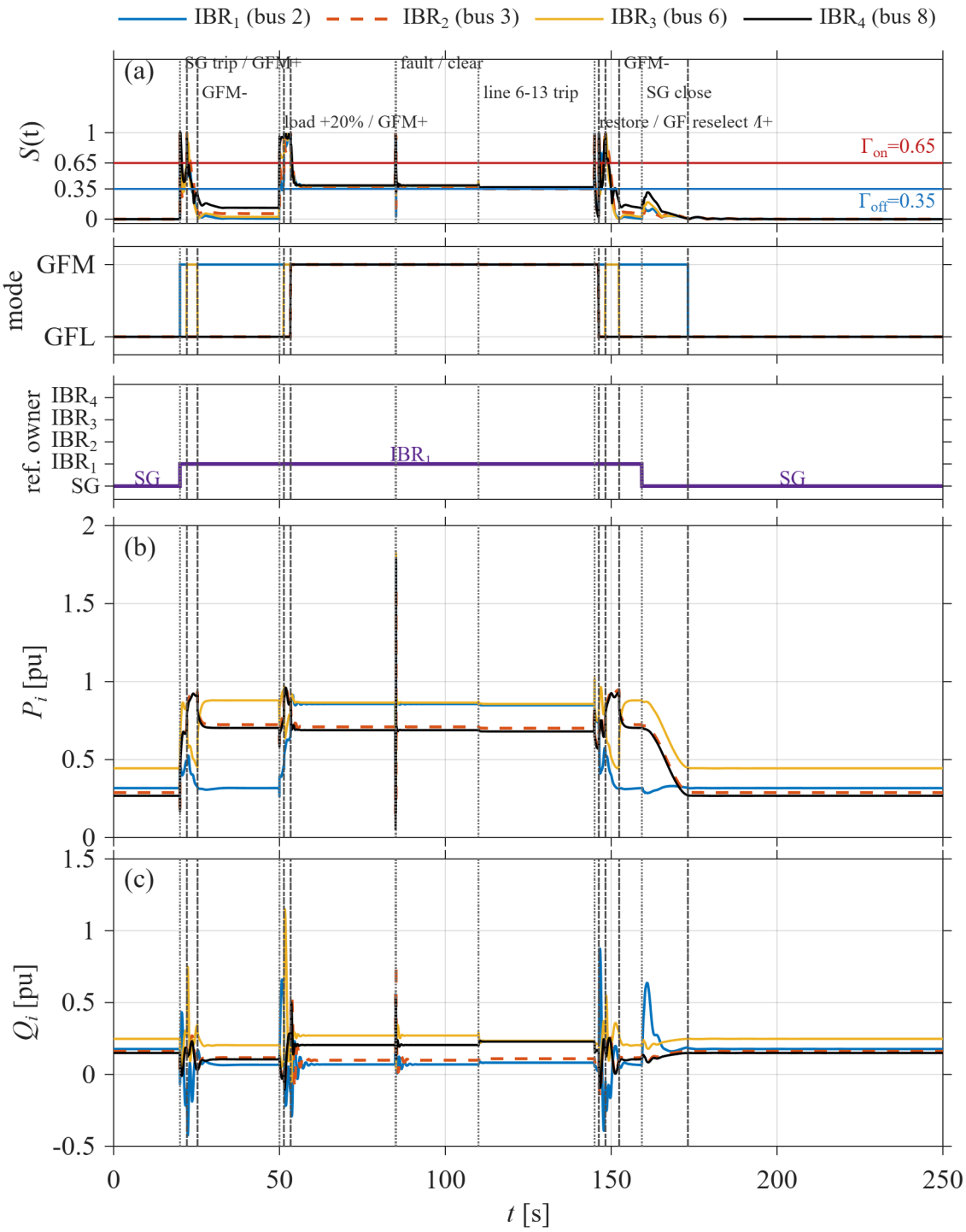
รูปที่ 6 แสดงกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟรายตัวของ IBR ตลอดขอบฟ้าเต็ม 0–250.000 s ด้านบนของแผงกำลังมีแถบสถานะเชิงกำกับสองแถบ: แถบบนสุด คือโหมด GFM/GFL ของ IBR แต่ละตัว และแถบที่สองคือ*เจ้าของแหล่งอ้างอิง* คืออุปกรณ์ตัวเดียวที่ถือมุมอ้างอิงของเกาะไฟฟ้าไว้ในแต่ละขณะ

โหมดและความเป็นเจ้าของแหล่งอ้างอิงเป็นสัญญาที่*แยกกัน*: IBR หลายตัวเป็น GFM ได้ พร้อมกัน แต่มีเพียงตัวเดียวที่เป็นเจ้าของมุมอ้างอิง ในผลนี้ SG เป็นเจ้าของจนถึง $t = 20$ s และกลับมาเป็นเจ้าของอีกครั้งหลังการต่อกลับ ช่วงระหว่างนั้น IBR_1 (บัส 2) เป็นผู้นำอ้างอิง เส้นทั้งสี่คือ IBR ทั้งสี่ตัวที่บัส 2, 3, 6 และ 8 ทุกจุดตัวอย่างเป็นค่าดิบที่ตัวแก้ยอมรับ และช่วง 0–250.000 s คือขอบฟ้าเต็มของวิถี (ไม่มีการตัดช่วงแสดงผล)

วงจรปิดสมบูรณ์: ตัวแปลงทุกตัวกลับสู่ grid-following เมื่อเครื่องกลับมาและทางลาดคำสั่ง C_1 จบลง ตัวกำกับจะทบทวนแผนที่โหมดเป็นครั้ง สุดท้าย ที่ $t = 173.1271$ s — จุดตัวอย่างแรกหลังทางลาด จบ โดย $173.1271 = 159.252 + 13.8752$ — มันส่ง หน่วย grid-forming ที่เหลืออยู่ตัวเดียวคือ IBR_1 กลับสู่ grid-following โดย ผ่านการตรวจเป็นการปลดแบบหนึ่งขั้นที่ตรวจกับตาราง SG-online: การจัดรูป all-grid-following ผ่านเกณฑ์ความหน่วงที่ประกาศไว้ด้วย ζ แย่สุด 0.156 เทียบข้อกำหนด 0.05 และเครื่องถือมุมอ้างอิงตั้งแต่การต่อกลับเป็นต้นไป จึงไม่จำเป็น ต้องมีแหล่งสร้างแรงดันอีก สถานะปลายทางคือ all-grid-following โดยเครื่องเป็น เจ้าของมุมอ้างอิงเพียงผู้เดียว — เป็นการจัดรูปเดียวกับที่การส่งมอบแบบประสาน (coordinated hand-back) ไปถึงโดยเส้นทางของมันเอง วงจรจึงปิดสมบูรณ์: เครื่องถูก ตัดตัวแปลงหนึ่งตัวรับหน้าที่สร้างแรงดัน หน่วยเสริมถูกเติมตามความรุนแรงและปลดเมื่อ ความรุนแรงลดลง เครื่องกลับมา และตัวแปลงทุกตัวกลับสู่ grid-following

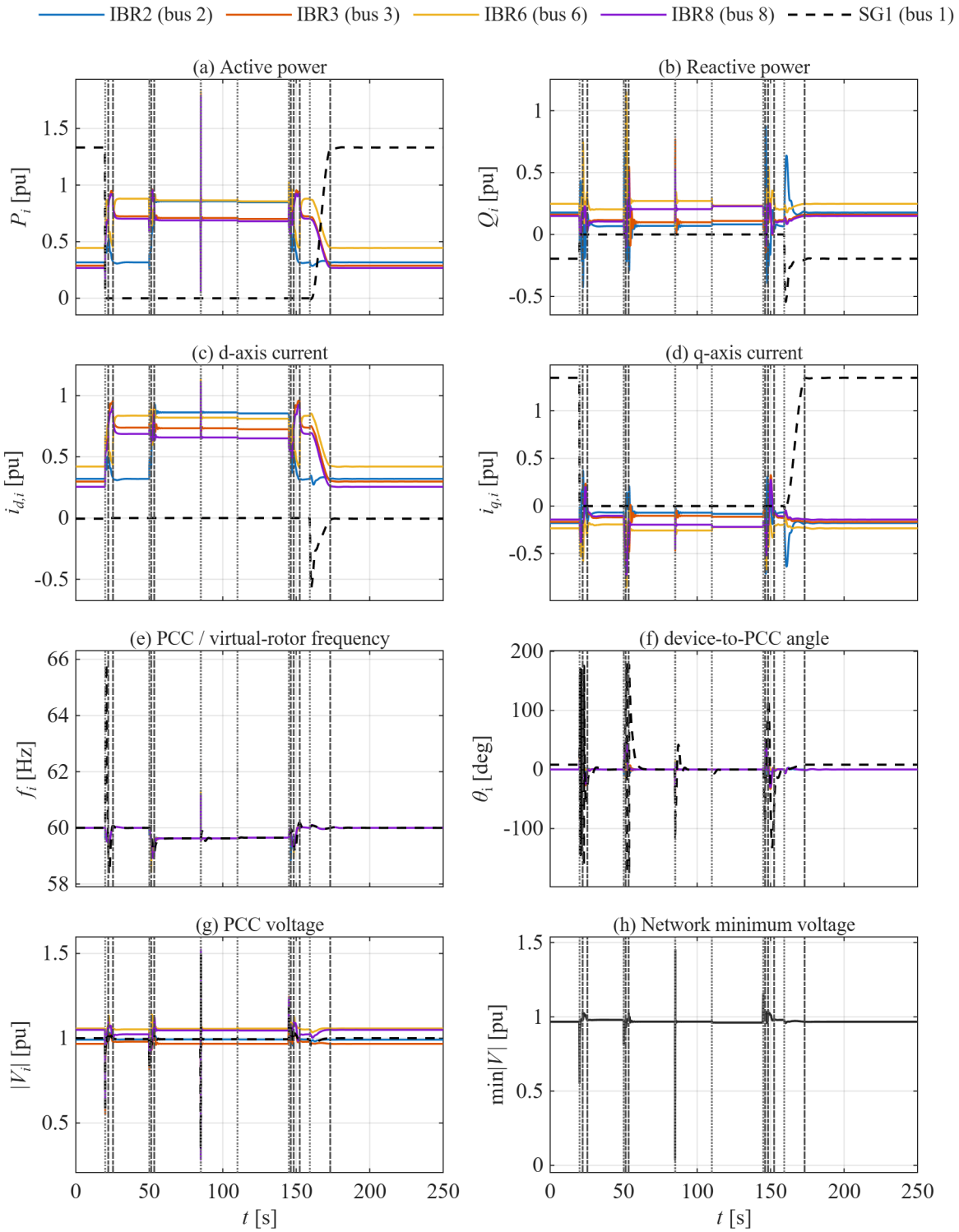
จุดสำคัญของผลชุดนี้อยู่ที่แถบโหมด: ตัวกำกับ*ไม่ได้*ยกทั้งสี่ตัวขึ้นพร้อมกัน มันเลื่อนขึ้นเป็นขั้น 4 ครั้ง (ที่ 22.089, 51.340, 53.379 และ 148.281 s) จนถือ GFM สูงสุด 4 ตัว แล้วปลดลง 3 ครั้งหลังการ ต่อกลับ ก่อนการส่งคืนครั้งสุดท้ายตามย่อหน้าข้างบน ในทางกลับกัน การ*ตรึง* 4 ตัวไว้ตั้งแต่วินาทีที่ตัด SG ทำให้ระบบพังที่ $t = 25.491$ s ก่อนถึงขอบฟ้า ทั้งที่ชุดเดียวกันนั้นผ่านการรับรองเชิงเส้น นั่นคือเหตุผลที่ลำดับ การเลื่อนขึ้นสำคัญไม่แพ้ปลายทาง

วิธีอ่านรูปที่ 6 อ่านจากบนลงล่างเป็นลำดับเหตุ–ผล: แถบโหมดบอกว่า ตัวกำกับ*ตัดสินใจ*อะไร แถบเจ้าของอ้างอิงบอกว่าใคร*ถือ*มุมอ้างอิงอยู่ และ แผง (a), (b) บอกว่าผลลัพธ์ทางไฟฟ้า*เป็นอย่างไร*หลังการตัดสินใจนั้น จุดที่ควร เน้นตอนนำเสนอคือ ที่ $t = 20$ s ทั้งสามแถวเปลี่ยนพร้อมกัน ซึ่งยืนยันว่าเกตกันการ สูญเสียแหล่งอ้างอิงทำงานก่อนตรรกะเวลาหน่วง ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3



รูปที่ 6: แถบบนสุด: โหมด GFM/GFL ของ IBR แต่ละตัว (ขั้น GFL/GFM สี่เส้นวางทับกัน ไม่มีการเลื่อนระดับเพื่อการแสดงผล) แถบที่สอง: เจ้าของแหล่งอ้างอิง (อุปกรณ์ที่ถือมุม อ้างอิงของเกาะไฟฟ้า — SG แล้วเป็น IBR_1 แล้วกลับเป็น SG) (a) กำลังจริงรายตัว P_i p.u. (b) กำลังรีแอกทีฟรายตัว Q_i p.u. เส้นประแนวตั้งคือเวลาเหตุการณ์ที่อ่านจาก ตารางเหตุการณ์และบันทึกที่ยอมรับ ทุกจุดเป็นค่าดิบที่ตัวแก้ยอมรับจากวิถี 250.000 วินาที ช่วง $t \in [0, 250.000]$ s เป็นขอบฟ้าเต็ม

รูปที่ 7 ขยายภาพให้เห็นตัวแปรทางไฟฟ้าครบแปดแผง เพื่อให้ตรวจสอบได้ว่า พฤติกรรมที่เห็นในรูปที่ 6 สอดคล้องกับกระแส แรงดัน มุม และความถี่หรือไม่ แผง (c), (d) คือกระแสในกรอบ dq ซึ่งเป็นที่ที่จะเห็นผลของตัวจำกัดกระแสแบบวงกลม ชัดที่สุดในช่วงฟอลต์ แผง (e), (f) คือความถี่และมุมเทียบจุดต่อร่วม ซึ่งเป็นตัวชี้ว่า อุปกรณ์ยังซิงโครไนซ์กันอยู่หรือไม่ และแผง (g), (h) คือแรงดันที่จุดต่อร่วมและแรงดัน ต่ำสุดของเครือข่าย ซึ่งเป็นตัวแปรที่ป้อนดัชนี J_V โดยตรง



รูปที่ 7: ผลตอบสนองทางไฟฟ้าแปดแผง (ค่าดิบที่ตัวแก้ยอมรับ จากวิถี 250.000 วินาที ช่วง $t \in [0, 250.000]$ s เป็นขอบฟ้าเต็ม) (a) กำลังจริง P_i (b) กำลังรีแอกทีฟ Q_i (c) กระแสแกน d (d) กระแสแกน q (e) ความถี่ที่จุดต่อร่วม หรือความถี่โรเตอร์เสมือน (f) มุมของอุปกรณ์เทียบจุดต่อร่วม (g) แรงดันที่จุดต่อร่วม (h) แรงดันต่ำสุดของเครือข่าย IBR ทั้งสี่ใช้สีตามคำอธิบายด้านบนรูป และ SG เป็นเส้น ดำประในทุกแผงที่มีคู่เทียบ แผง (h) เป็นสเกลาร์ของทั้งระบบจึงมีเส้นเดียวโดยนิยาม