Adaptive System-Level GFL/GFM Switching

Event-triggered finite-control-set predictive supervisor สำหรับ IEEE 14-bus: 1 SG + 4 IBR

แนวทางพัฒนาต่อจาก AGSI++ local switching

4 สิงหาคม 2569

1. Feedback ที่ต้องตอบให้ตรงประเด็น

ข้อจำกัดของวิธีปัจจุบัน

AGSI++ เป็นดัชนีความเครียด *ราย IBR* แล้วใช้ threshold, hysteresis และ dwell สั่ง state machine

- มี V, f, RoCoF, P, SCR, v_q, GRA แต่เป็นข้อมูล local
- ไม่ได้เลือกจากผลกระทบต่อโครงข่ายทั้งระบบ
- เมื่อถึงเกณฑ์จึงเปลี่ยนโหมดตามกฎที่ออกแบบไว้ล่วงหน้า

คำถามวิจัยใหม่

ก่อนสลับ เราจะรู้ได้อย่างไรว่า **ควรสลับตัวใดกี่ตัว และใครเป็น reference leader** เพื่อให้ระบบโดยรวมปลอดภัยที่สุด?

PROPOSED เพิ่ม adaptive system-level supervisor เหนือ AGSI++

2. แยกให้ชัด: ของที่มีแล้วกับของที่จะพัฒนา

ชั้นควบคุม	สถานะปัจจุบัน	งานที่จะเพิ่ม
Local indicator	AGSI++ คำนวณ stress ราย IBR	ใช้เป็น event trigger และข้อมูลประกอบ
Local state machine	GFL/GFM, threshold, dwell, hysteresis	คงไว้เป็น safety interlock
Reference transaction	SG-trip override และ SG handback	ให้ supervisor เลือก leader/ชุด GFM
System decision	ยังไม่มีการเปรียบเทียบ mode ทั้งระบบ	ประเมิน candidate จาก full-network state
Prediction	ไม่มี look-ahead ก่อน commit	จำลอง candidate ช่วงสั้นก่อนเลือก

ขอบเขตงานรอบถัดไป

พัฒนา logic การเลือกโหมดเท่านั้น; ไม่เพิ่ม AVR, ไม่ใช้ BO/LLM ในวงรอบสั่งสวิตช์ และไม่เปลี่ยนสมการ SG/IBR ที่ตรวจแล้ว

3. Method คืออะไร?

ชื่อที่เสนอ

Event-Triggered Finite-Control-Set Predictive Supervisor (ET-FCSPS)

Event-triggered

ทำงานเมื่อ AGSI/event/topology เปลี่ยน

ไม่ค้นหาทุก integration step

Finite control set

ตัวเลือกเป็น binary mode vector

ที่แจกแจงได้ครบ ไม่ต้องหา optimum บน space ต่อเนื่อง

Predictive

ใช้แบบจำลองโครงข่ายทำนายผลช่วงสั้นก่อน commit คำสั่งจริง

AGSI++ “ขอพิจารณาสลับ” $\neq$ “สั่งสลับทันที”

นำแนวคิด finite-action prediction มาปรับใช้ที่ระดับ supervisory mode selection ไม่ใช่ converter-level semiconductor switching

4. ตัวแปรตัดสินใจ: 16 mode combinations

สำหรับ IBR 4 ตัว กำหนด

$$\mathbf{m} = [m_1, m_2, m_3, m_4] \in \{0,1\}^4, \qquad 0 = \text{GFL},\ 1 = \text{GFM}.$$

- มี candidate ทั้งหมด $2^4 = 16$ รูปแบบ
- ถ้า SG offline เพิ่มตัวแปร owner $r \in \{1,2,3,4\}$
- บังคับ $m_r = 1$ และมี reference owner เพียงหนึ่งตัว
- ตัด candidate ที่ละเมิด dwell/lockout ก่อนจำลอง

ตัวอย่าง

$[0000]$	all GFL
$[1000]$	IBR1 GFM
$[1010]$	IBR1,3 GFM
$[1111]$	all GFM

ไม่ใช่ PF slack

owner คือ angle/frequency reference ของ island; ทกอปกรณ์ยังอยู่ใน full KCL

5. Controller ต้องมองอะไรทั้งระบบ?

สถานะโครงข่าย

- $V_{\text{min}}, V_{\text{max}}$ และ voltage violation ทุกบัส
- topology, island, สายที่เปิด และ electrical distance
- line loading และ short-circuit strength
- SG/reference availability: GRA

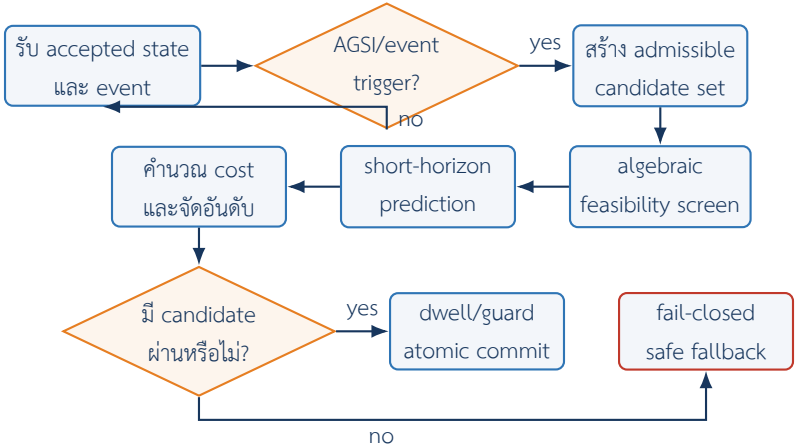
สมดุลและ headroom

- frequency/COI frequency และ RoCoF
- $\Delta P = P_{gen} - P_{load} - P_{loss}$
- Q requirement และ reactive reserve
- P/Q headroom, current limit และ energy availability ของ IBR

ข้อควรระวัง

"กำลังรวม" ต้องรวม network losses และใช้ sign/base เดียวกัน ไม่ใช่บวกค่า P จากกราฟโดยตรง

6. ลำดับการทำงานของ ET-FCSPS



ใช้เฉพาะ accepted production states; candidate trial ห้ามแก้ state จริงก่อน transaction commit

7. ชั้นที่ 1: feasibility gates ก่อนจัดอันดับ

Candidate $c = (\mathrm{m}, r)$ ต้องผ่านทุก hard constraint:

$$
\begin{aligned}
g_{KCL}(c): &\quad \|F(x,y,c)\|_\infty \le \varepsilon_{KCL}, \\
g_V(c): &\quad V_{min}^{lim} \le |V_b| \le V_{max}^{lim} \quad \forall b, \\
g_I(c): &\quad |I_i| \le I_{i,max} \quad \forall i, \\
g_R(c): &\quad P_{reserve}, Q_{reserve} \text{ ไม่ติดลบ}, \\
g_{ref}(c): &\quad \text{ทุก energized island มี reference owner หนึ่งตัว}, \\
g_{hyb}(c): &\quad \text{ไม่ละเมิด dwell, lockout และ state-transfer contract.}
\end{aligned}
$$

หลัก fail-closed

ถ้าไม่มี candidate ผ่าน ห้ามเลือก “ตัวที่ cost น้อยที่สุด” จากชุดที่ผิด constraint; ต้องใช้ safe fallback ที่ประกาศไว้และบันทึกเหตุผล

8. ชั้นที่ 2: prediction และ objective

สำหรับ candidate ที่ผ่าน gate ทำนายช่วง T_p แล้วคำนวณ

$$J(c) = w_V J_V + w_f J_f + w_R J_{RoCoF} + w_P J_{\Delta P} + w_Q J_{Q,res} + w_N N_{GFM} + w_S N_{switch}.$$

- J_V: integral/max ของ voltage violation ทั้งระบบ
- J_f, J_{RoCoF}: frequency security
- $J_{\Delta P}$: active-power imbalance รวม losses
- $J_{Q,res}$: reactive reserve shortage
- N_{GFM}: ไม่เปิด GFM เกินจำเป็น
- N_{switch}: ลด chatter/wear
- tie-break: residual, reserve margin, index ลำดับ IBR

Numerical-integrity contract

นิยาม normalization, weight, horizon และ tie-break ก่อนดูผล; ห้าม tune เพื่อให้ scenario ที่ต้องการชนะ

9. Reference leader และ coordinated transaction

เมื่อ SG trip / $GRA = 0$

1. freeze accepted state และสร้าง candidate
2. เลือก GFM set พร้อม owner r
3. map state ให้ทุก branch
4. solve right-limit KCL
5. commit ทั้ง transaction แบบ atomic

เมื่อ SG จะกลับ

1. restore topology/load ตาม event contract
2. ตรวจ $\Delta V, \Delta f, \Delta\theta$ ครบ dwell
3. close SG และ solve right-limit KCL
4. handback reference แบบ bumpless
5. ให้ supervisor ประเมิน all-GFL ใหม่

AGSI ไม่ได้ถูกยกเลิก: เป็น local evidence; transaction coordinator เป็นผู้อนุมัติคำสั่งระดับระบบ

10. ตัวอย่างการตอบสนองที่คาดหวัง (ยังไม่ใช่ผล)

เหตุการณ์	AGSI local	การประเมินระบบ	คำสั่งที่เป็นไปได้
no event	ต่ำทุกตัว	voltage/power/reference ผ่าน	คง all-GFL
load step เบา	บางตัวสูงขึ้น	reserve ยังเพียงพอ	ไม่สลับ หรือ GFM 1 ตัว
fault เฉพาะจุด	IBR ใกล้ fault สูง	ทดสอบตำแหน่งและ voltage support	เลือก GFM ใกล้พื้นที่อ่อน
SG trip	$GRA = 0$	island ต้องมี reference	เลือก owner และ GFM set แบบ atomic
SG reclose	index อาจยังสูง	sync guard + predicted handback	คืน SG reference แล้วลด GFM

สิ่งที่ต้องพิสูจน์ด้วยการจำลอง

คำสั่งข้างต้นเป็น design hypothesis; controller อาจเลือกต่างออกไปตามผล feasibility/prediction จริง

11. ทำไมเหมาะกว่าการใช้ BO เป็น online switcher?

ประเด็น	Bayesian optimisation	ET-FCS predictive supervisor
โจทย์หลัก	หา optimum ของ expensive black-box objective	เลือก action จาก finite set ภายใต้ state ปัจจุบัน
คำตอบต่อ event	อาศัย surrogate/acquisition ที่เรียนจาก samples	ประเมิน admissible actions ที่แจกแจงไว้โดยตรง
hard constraints	ต้องออกแบบ constrained BO เพิ่ม	reject candidate ก่อน ranking ได้ชัดเจน
traceability	ต้องอธิบาย surrogate และ uncertainty	แสดง gate, prediction และ cost ของทุก candidate
ข้อมูลฝึก	ต้องมี evaluations เพียงพอ	ไม่ต้องฝึก model เพิ่ม; ใช้ project plant model
ข้อเสีย	exploration และผลขึ้นกับ prior/kernel	computation โตตาม candidate/horizon

ข้อสรุปที่อ้างได้อย่างเป็นธรรม

ไม่ได้ “ดีกว่า BO ทุกกรณี” แต่เหมาะกว่ากับ decision set 16 รูปแบบที่ต้อง deterministic, constraint-aware และ audit ได้; BO ยังเหมาะกับ offline design study

12. ลดเวลาคำนวณอย่างไรให้ใช้งานได้

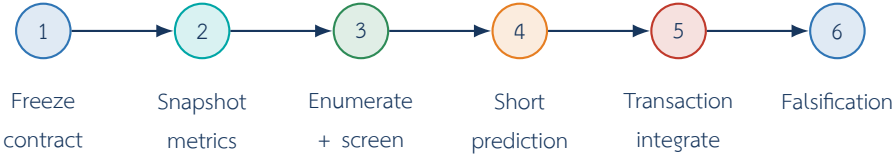
16 candidates
$\Downarrow$
3–5 finalists
$\Downarrow$
short TDS

1. **Event-triggered**: ไม่เรียก controller ทุก Δt
2. **Logical pruning**: ตัด mode ที่ผิด dwell, owner หรือ topology
3. **Algebraic screening**: ใช้ PF/KCL และ reserve gate ก่อน
4. **Sensitivity ranking**: ใช้ voltage/electrical-distance screening ที่ตรวจ oracle แล้ว
5. **Short horizon**: จำลองเฉพาะ finalist และหยุดทันทีเมื่อผิด gate
6. **Cache แบบ read-only**: reuse equilibrium ที่มี provenance เดียวกันเท่านั้น

ข้อจำกัดสำคัญ

production 160-s ปัจจุบันใช้เวลาประมาณ 80 นาที จึงต้องมี profiling/runtime gate ก่อนกล่าวถึง real-time deployment

13. Roadmap การพัฒนา



- Phase 1: state/input/base/sign/schema
- Phase 2: global V, P, Q, f, reserve, topology
- Phase 3: 16-action deterministic oracle
- Phase 4: predictor + cost provenance
- Phase 5: atomic switch/rollback/fallback
- Phase 6: multi-event, dt/runtime sensitivity

14. Predeclared verification matrix

Gate	ต้องตรวจอะไร	หลักฐานผ่าน
Unit/oracle	enumeration ครบและ tie-break deterministic	16 vectors ไม่ซ้ำ, ผล repeatable
Metric identity	$P/Q/loss/reserve$ ใช้ base/sign ถูกต้อง	เทียบ direct KCL identities
Feasibility	candidate ผิด constraint ถูก reject	injected counterexamples
Hybrid transaction	state mapping/right-limit/rollback	no partial commit, finite residual
Behaviour	no-event, fault, load, SG trip/reclose	เลือก mode มีเหตุผลและไม่มี chatter
Numerical	Δt, horizon, finite-difference sensitivity	รายงานความต่าง ไม่ tune tolerance
Runtime	deadline และจำนวน candidate TDS	percentile runtime + fail-closed timeout

ผ่านทั้งหมดก่อนเทียบ performance กับ BO

15. สิ่งที่ต้องตกลงกับอาจารย์ก่อน implement

1. นิยาม “system recovery” และ operating limits ที่ใช้เป็น hard constraints
2. prediction horizon T_p และ controller invocation/deadline
3. reserve/energy model ที่อนุญาตให้ใช้จริง
4. cost normalization และ weight provenance – source, derived หรือ design choice
5. safe fallback เมื่อทุก candidate ไม่ผ่าน
6. BO ใช้เป็น baseline/offline tuner หรือไม่ และใช้ข้อมูลชุดเดียวกันอย่างไร

สิ่งที่ยังไม่ควรพูด

ยังไม่อ้างว่า ET-FCSPS มีเสถียรภาพดีกว่า BO, เร็วกว่า BO หรือเลือก GFM น้อยกว่า จนกว่าจะ implement และทดสอบบน input/event contract เดียวกัน

16. ข้อเสนอสำหรับการประชุม

One-sentence proposal

ใช้ AGSI++ เป็น local event indicator แล้วให้ ET-FCS predictive supervisor ประเมิน mode combination ของ IBR จาก full-network feasibility และ short-horizon response ก่อน commit การสลับ

จุดเด่นที่คาดหวัง

- system-aware แทน threshold-only
- deterministic และอธิบายย้อนหลังได้
- enforce hard constraints ก่อนเลือก
- ใช้ finite set เล็กของระบบเราโดยตรง

ความเสี่ยงที่ต้องจัดการ

- computational cost ของ prediction
- model mismatch และ reserve uncertainty
- horizon/weight sensitivity
- closed-loop stability ยังต้องพิสูจน์

แหล่งอ้างอิงหลักและขอบเขตการอ้าง

1. J. Rodriguez et al., “State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016, 2013. DOI: 10.1109/TII.2012.2221469.
2. P. I. Frazier, “A Tutorial on Bayesian Optimization,” arXiv:1807.02811, 2018.
3. J. Snoek, H. Larochelle, and R. P. Adams, “Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms,” *NeurIPS 25*, 2012.

4. สมการ plant, AGSI++, full-KCL และ event transaction ที่กล่าวถึงในสไลด์ อ้างจาก implementation/derivation ภายในโครงการ; ET-FCSPS เป็น **PROJECT-DERIVED PROPOSAL** ที่ยังไม่ implement

ขอบเขต

เอกสารนี้เสนอ architecture และ verification plan ไม่ใช่หลักฐานผล closed-loop ของ controller ใหม่