

ການສຶກສາການໄຫຼຂອງລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ ສຳລັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າທີ່ເຊື່ອມຕໍ່ກັບຕາຂ່າຍອ້າງອີງ ໂດຍນຳໃຊ້ ຮູບການສຶກສາພາວະດີສຸດ ທີ່ຄຳນຶງການສຶກສາໄຫຼພາວະດີສຸດຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ

ຢາບໍ່ເລົ່າ ໝໍເຮີ, ພັນໄຊ ຈັນທະວົງ, ເພັດສິລາ ເກຍດູ່ໄກສີ,

ສຸເມກ ອິນທະລາ, ແສງປອະສິງ ພຣະກອນຄາ, ຢຸດທະນາລັກ ວິໄລສາຣ

ພາກວິຊາ ວິສະວະກຳໄຟຟ້າ, ຄະນະວິສະວະກຳສາດ, ມະຫາວິທະຍາໄລແຫ່ງຊາດ, ສປປ ລາວ

* ຕິດຕໍ່ພົວພັນ: ຢຸດທະນາລັກ ວິໄລ

ສາຣ, ພາກວິຊາ ວິສະວະກຳໄຟຟ້າ,

ຄະນະວິສະວະກຳສາດ,

ມະຫາວິທະຍາໄລແຫ່ງຊາດ,

ເບີໂທ: +856 20 9343 7788,

ອີເມວ:

youthanalack@fe-nuol.edu.la

ບົດຄັດຫຍໍ້

ການສຶກສາການໄຫຼກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ ຫຼື AC power flow (ACPF) ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ຢ່າງກວ້າງຂວາງ, ໂດຍສະເພາະເພື່ອການວາງແຜນກໍ່ສ້າງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ແລະ ການເຮັດວຽກຂອງລະບົບໄຟຟ້າ. ນອກຈາກນີ້, ACPF ຍັງເປັນພື້ນຖານນຳໄປສູ່ວຽກງານການສຶກສາ ການໄຫຼພາວະດີສຸດຂອງກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ Alternative Current Optimal Power Flow ຂຽນຫຍໍ້ດ້ວຍ “ACOPF”. ອີງຕາມຜົນປະໂຫຍດເຫຼົ່ານີ້, ບົດຄວາມສະບັບນີ້ໄດ້ສະເໜີການສຶກສາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ, ໂດຍສະເພາະການນຳໃຊ້ ຮູບການສຶກສາພາວະດີສຸດ ຫຼື Optimization ທີ່ເປັນພື້ນຖານຂອງ ACOPF. ນອກຈາກນີ້, ໃນບົດຄວາມສະບັບນີ້ໄດ້ລວມເອົາທິດສະດີພື້ນຖານສຳລັບການສຶກສາ ACPF, ສົມຜົນທາງຄະນິດສາດ ແລະ ຜົນໄດ້ຮັບຈາກການຊົມໃຊ້ທີ່ສຶກສາດ້ວຍ ACPF. ໃນກໍລະນີນີ້, ຮູບແບບທາງຄະນິດສາດສຳລັບການສຶກສາ ACPF ຊຶ່ງເປັນລະບົບສົມຜົນທາງຄະນິດສາດທີ່ມີຄຸນລັກສະນະບໍ່ເປັນເສັ້ນຊື່ (Non-linear) ໄດ້ຖືກສະເໜີໃນບົດຄວາມນີ້. ໂປຼແກຼມ MATLAB ດ້ວຍການນຳໃຊ້ຄຳສັ່ງ fmincon ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ສຳລັບການແກ້ໂຈດບັນຫາດັ່ງກ່າວ. ເພື່ອການປະເມີນ, ຜົນອອກທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການແກ້ໂຂສົມຜົນຂອງການສຶກສາ ACPF ໂດຍໃຊ້ໂປຼແກຼມ MATLAB ໄດ້ຖືກນຳມາປຽບທຽບກັບຜົນໄດ້ຮັບຈາກໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ POWERWORLD. ໃນຂະນະທີ່ລະບົບສົ່ງຈ່າຍ 3 ເຟດສ໌ແບບດຸ່ນດ່ຽງທີ່ມີ 5 ຮາວໄຟ ແລະ 8 ຮາວໄຟ ທີ່ມີຄວາມໃກ້ຄຽງກັບໂຄງສ້າງເຄືອຂ່າຍສາຍສົ່ງຂອງ ລັດວິສາຫະກິດໄຟຟ້າລາວ (EDL) ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ສຳລັບການສຶກສາໃນຄັ້ງນີ້.

ຄຳສັບສຳຄັນ: ການສຶກສາການໄຫຼກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ, ໂປຼແກຼມ POWERWORLD, ໂປຼແກຼມ MATLAB, ລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ.

ມູນບົດຄວາມ:

ການສົ່ງບົດ: 13 ມີນາ 2024

ການປັບປຸງ: 28 ເມສາ 2024

ການຕອບຮັບ: 29 ເມສາ 2024

An AC Power Flow Analysis for Grid-Connected AC Electrical Network using Optimization Method Under Consideration of ACOPF

Yaporlao Norher, Phanxay Chanthavong, Phetsila Kiatoukaisy,
Soumek Inthala, Sengprasong Phrakonkham, Youthanalack Vilaisarn*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, National University of Laos, Lao PDR

Abstract

Alternative current power flow analysis (ACPF) is a key component for power system analysis, especially for planning the network infrastructure and analyzing its operation. Moreover, an ACPF is a base for learning an alternative current optimal power flow (ACOPF). According to these advantages, this article proposes the discussion on ACPF in detail in which can be used as a reference for helping the readers (e.g., students) deeply understand an ACPF and use in the particular works. This paper includes the basic theory for ACPF, formulation, and solution approach. Moreover, a nonlinear ACPF is formulated according to the optimization format and presented in this work. A MATLAB (i.e., fmincon) is used for solving the formulated problem. In order to validate the solution, the numerical results delivered by MATLAB are compared to those obtained by a commercial tool, POWERWORLD. Finally, the 5-bus and 8-bus balanced systems, which are close to the practical system, i.e., EDL transmission network structure, are deployed for validation. **Keywords:** AC Power Flow Analysis, POWERWORLD, MATLAB, Power System.

*Correspondence:

Youthanalack Vilaisarn,
Department of Electrical
Engineering,
Faculty of Engineering,
National University of Laos,
Lao PDR,
Tel.: +856 20 9343 7788,
Email:
youthanalack@fe-nuol.edu.la

Article Info:

Submitted: March 13, 2024

Revised: April 28, 2024

Accepted: April 29, 2024

1. ບົດນຳ

ການສຶກສາລະບົບໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບໃນສະພາວະ ຄົງຕົວ (AC power system steady-state analysis) ຂອງລະບົບໄຟຟ້າໃດໜຶ່ງຕ້ອງພິຈາລະນາເຖິງແຮງດັນໄຟຟ້າ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ, ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ, ສຳປະສິດກຳລັງໄຟຟ້າ (Power Factor) ແລະ ການສູນເສຍຂອງລະບົບ ຊຶ່ງເປັນພື້ນຖານຂອງການວິເຄາະລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ (Power System Analysis ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ PSA) (Afolabi et al., 2015 & Glover et al., 2023). ໃນ ຂະບວນການວິເຄາະຈະນຳໃຊ້ເຄື່ອງມືການສຶກສາ ACPF ຊຶ່ງເປັນການສຶກສາທີ່ເໝາະສົມສຳລັບການຈຳລອງໃນການ ວາງແຜນລະບົບໄຟຟ້າ ແລະ ຍັງສາມາດອີງໃສ່ການຄົ້ນຄວ້າ ໃນຂະແໜງການເຊັ່ນ: ຄວາມສະຖຽນລະພາບຂອງລະບົບ (Bounlavong & Phrakonkham, 2017), ວາງແຜນ ການຕິດຕັ້ງບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ (Manoloth & Phrakonkham, 2017), ການຊົມໃຊ້ພະລັງງານລົມ

(Bounseng & Phonepadith, 2022) ແລະ ອື່ນໆ (Glover et al., 2023).

ໃນປັດຈຸບັນ, ໄດ້ມີການນຳໃຊ້ເຄື່ອງມືຫຼາຍຊະນິດ ເຂົ້າໃນການສຶກສາ ACPF ດັ່ງເຊັ່ນ: ເຄື່ອງມືສຶກສາການໄຫຼ ໄຟຟ້າແບບ Newton Raphson (NR) (Afolabi et al., 2015)(Glover et al., 2023), ແບບ Backward-Forward-Sweep (BFS) (Sunisith & Meena, 2014), ແບບ Gauss Seidel (GS) ແລະ ແບບ Levenberg-Marquardt (LMA) (Lagace et al., 2008). ການວິເຄາະການໄຫຼຂອງກຳລັງ AC ແມ່ນອີງໃສ່ຂໍ້ມູນຕົວຈິງທີ່ຖືກລະບຸໄວ້ກ່ອນ (ເຊັ່ນ: ກຳລັງໄຟຟ້າທີ່ຜະລິດ ໂດຍບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ (Zhao et al., 2016)) ແລະ ຄຳນວນ ຫາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ໂດຍບໍ່ຄຳນຶງເຖິງການໄຫຼ ພາວະດີສຸດ (Vilaisarn et al., 2023). ແຕ່ຜ່ານມາການ ໃຊ້ ACPF ເຂົ້າໃນວຽກງານການວິເຄາະຕ່າງໆແມ່ນຍັງບໍ່ ທັນມີການຮີບໂຮມ ແລະ ສ້າງເປັນບົດອ້າງອີງເທື່ອ ໂດຍ ສະເພາະສະບັບພາສາລາວ. ນອກນັ້ນ, ເມື່ອມີຄວາມຕ້ອງ

ການຢາກສຶກສາ ACOF ຈຳເປັນຕ້ອງເຂົ້າໃຈແນວຄວາມຄິດຂອງ ACPF ພ້ອມດ້ວຍການຕັ້ງໂຈດບັນຫາໃນຮູບການສຶກສາພະວະດິສຸດ ຫຼື optimization model ທີ່ເປັນພື້ນຖານ. ແຕ່ສ່ວນຫຼາຍນັກສຶກສາຍັງຂາດຄວາມເຊື່ອໝັ້ນໃນການຕັ້ງໂຈດບັນຫາກ່ຽວກັບການສຶກສາການໄຫຼກຳລັງໄຟຟ້າ ແລະ ຍັງຂາດຄວາມເຂົ້າໃຈແຈ້ງໃນຮູບແບບຄະນິດສາດ ໂດຍສະເພາະຮູບການສຶກສາພະວະດິສຸດ. ເພາະວ່ານັກສຶກສາສ່ວນຫຼາຍຈະມັກການນຳໃຊ້ໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ ຫຼາຍກວ່າການຕັ້ງໂຈດບັນຫາ ແລະ ຂຽນລະຫັດໂປຼແກຼມ (code) ເພື່ອແກ້ໂຈດບັນຫາ. ແຕ່ໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບອາດບໍ່ຕອບສະໜອງວຽກງານບາງອັນ ໂດຍສະເພາະໃນວຽກງານການຄົ້ນຄວ້າ.

ອີງຕາມສິ່ງທ້າທາຍເຫຼົ່ານີ້, ບົດຄວາມສະບັບນີ້ ໄດ້ເນັ້ນໃສ່ການຊ່ວຍເຫຼືອໃຫ້ນັກສຶກສາເຂົ້າໃຈແນວຄວາມຄິດຂອງການສຶກສາ ACPF ໂດຍຜ່ານວິທີການຕັ້ງໂຈດແບບ Optimization. ໃນບົດຄວາມນີ້, ການປະກອບສ່ວນຫຼັກສາມາດສັງລວມໄດ້ດັ່ງຕໍ່ໄປນີ້:

- ສ້າງລະບົບສົມຜົນການສຶກສາ ACPF ໃນຮູບແບບການສຶກສາພະວະດິສຸດເພື່ອເປັນພື້ນຖານນຳໄປສູ່ການສ້າງໂຈດບັນຫາທາງຄະນິດສາດຂອງການສຶກສາ ACOF;
- ວິເຄາະຜົນຮັບທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການແກ້ໂຈດ ACPF ໃນຮູບແບບການສຶກສາພະວະດິສຸດ ແລະ ໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ.

2 ອຸປະກອນ ແລະ ວິທີການ

2.1 ທິດສະດີພື້ນຖານການສຶກສາ ACPF ແລະ Optimization

ການສຶກສາ ACPF ແມ່ນການຄິດໄລ່ແຮງດັນໄຟຟ້າ ແລະ ມຸມແຮງດັນໄຟຟ້າຂອງແຕ່ລະຮາວໄຟໃນລະບົບໄຟຟ້າທີ່ເຮັດວຽກຢູ່ໃນສະພາວະຄົງທີ່. ອີງໃສ່ທັງສອງຕົວປ່ຽນນີ້, ສາມາດຄິດໄລ່ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ທີ່ສົ່ງຈ່າຍໃຫ້ແຕ່ລະຮາວໄຟໄດ້ (Glover et al., 2023), (Turan Gonen, 2016). ໂດຍທົ່ວໄປ, ສົມຜົນ (1) ຫຼື (2) ທີ່ເປັນສົມຜົນພື້ນຖານສະແດງເຖິງການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າແມ່ນ ສາມາດແກ້ໄຂໄດ້ ຈາກມາຕຣິດອິມພີແດນສ (ພາສາອັງກິດ: Impedance matrix ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ Z_{bus}) ຫຼື ຈາກມາຕຣິດແອດມິດແຕນສ (ພາສາອັງກິດ: Admittance

matrix ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ Y_{bus}) ທີ່ກຳນົດໄດ້. ໂດຍວ່າ, $\bar{I}$ ແມ່ນເວັກເຕີກະແສ ແລະ $\bar{V}$ ແມ່ນເວັກເຕີແຮງດັນ.

$$\bar{I} = \bar{Y}^{bus} \bar{V} \quad (1)$$

$$\bar{V} = (\bar{Y}^{bus})^{-1} \bar{I} = \bar{Z}^{bus} \bar{I} \quad (2)$$

ຢູ່ໃນການສຶກສາ ACPF, ແຕ່ລະຮາວໄຟຈະປະກອບດ້ວຍ 4 ຕົວປ່ຽນທາງໄຟຟ້າ (Afolabi et al., 2015): ແຮງດັນໄຟຟ້າ (ສັນຍາລັກດ້ວຍ $|\bar{V}|$), ມຸມແຮງດັນໄຟຟ້າ (ສັນຍາລັກດ້ວຍ δ), ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ (ສັນຍາລັກດ້ວຍ P) ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າ ສຳນຶກ (ສັນຍາລັກດ້ວຍ Q) ຊຶ່ງສາມາດສະແດງດ້ວຍຮູບທີ 1.

ໃນແຕ່ລະຮາວໄຟ, 2 ຕົວປ່ຽນຈະສາມາດກຳນົດໄດ້, ໃນຂະນະທີ່, 2 ຕົວປ່ຽນທີ່ເຫຼືອແມ່ນຕ້ອງໄດ້ຄິດໄລ່ຈາກ ACPF. ຈາກຮູບທີ 1 ເຮົາສາມາດຂຽນສົມຜົນການໄຫຼກຳລັງເຂົ້າຫາຮາວໄຟແບບພື້ນຖານດ້ວຍຕາມສົມຜົນ (3).

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \left[\begin{array}{c} (P_i^G - P_i^L) \\ +j(Q_i^G - Q_i^L) \end{array} \right], \forall i \in \Omega_{BUS} \quad (3)$$

ຊຶ່ງ, P_i^G ແລະ Q_i^G ແມ່ນກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກຂອງບໍ່ກຳນົດໄຟຟ້າທີ່ສະໜອງໃຫ້ຮາວໄຟ i ; P_i^L ແລະ Q_i^L ແມ່ນກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກຂອງໂຫຼດຊົມໃຊ້ຢູ່ຮາວໄຟ i . P_i ແລະ Q_i ແມ່ນກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກທີ່ໄຫຼເຂົ້າຮາວໄຟ i . $\bar{S}_i$ ກຳລັງໄຟຟ້າປະກົດໃນຮູບແບບຈຳນວນສົນທີ່ໄຫຼເຂົ້າຮາວໄຟ i .

ໂດຍທົ່ວໄປ, ໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າກຳລັງແບບມີການເຊື່ອມຕໍ່ກັບຕາຂ່າຍອ້າງອີງ ສາມາດແບ່ງຊະນິດຮາວໄຟອອກເປັນ 3 ຊະນິດ ອີງຕາມຈຳນວນຕົວປ່ຽນທາງໄຟຟ້າທີ່ສາມາດກຳນົດໄດ້ ດັ່ງທີ່ສະແດງໃນຕາຕະລາງທີ 1.

Slack Bus ແມ່ນ ຮາວໄຟອ້າງອີງ, ເປັນຮາວໄຟທີ່ສົມມຸດວ່າມີເຄື່ອງກຳນົດໄຟຟ້າທີ່ໃຫຍ່ເຊື່ອມຕໍ່ຢູ່ ໂດຍຈະເຮັດໜ້າທີ່ແລກປ່ຽນ (ຮັບເຂົ້າ ແລະ ສົ່ງອອກ) ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ (P) ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ (Q) ໃຫ້ກັບລະບົບ ເມື່ອມີຄວາມຕ້ອງການ ຫຼື ສ້າງຄວາມສົມດຸນໃຫ້ລະບົບ ໃນກໍລະນີຕົວຊົມໃຊ້ເກີດມີການປ່ຽນແປງ. ດັ່ງນັ້ນ, ຮາວໄຟອ້າງອີງ ໃນທາງທິດສະດີຈຶ່ງສົມມຸດຖານວ່າຂະໜາດຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ ແລະ ມຸມແຮງດັນໄຟຟ້າມີຄ່າເທົ່າກັບ $|\bar{V}| = 1 \angle 0^\circ$, ຊຶ່ງຈະໃຊ້ເປັນຂໍ້ມູນອ້າງອີງໃນການຄິດໄລ່ ACPF. ສ່ວນ PV Bus ແມ່ນຮາວໄຟທີ່ມີເຄື່ອງກຳນົດ

ໄຟຟ້າເຊື່ອມຕໍ່ຢູ່ ແລະ ມີຄວາມສາມາດໃນການຄວບຄຸມແຮງດັນໄຟຟ້າໂດຍອາໄສລະບົບຄວບຄຸມແຮງດັນໄຟຟ້າອັດຕະໂນມັດ ຫຼື Automatic Voltage Regulator (AVR), ໂດຍຈະເຮັດໜ້າທີ່ຮັກສາແຮງດັນໄຟຟ້າໃຫ້ຢູ່ໃນພາວະຄົງທີ່ ແລະ ລະບົບຄວບຄຸມການຜະລິດທີ່ສາມາດກຳນົດການຜະລິດກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ (P) ເພື່ອຕອບສະໜອງໃຫ້ກັບລະບົບ. ສ່ວນກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ (Q) ແລະ ມຸມແຮງດັນໄຟຟ້າ (δ) ຈະເປັນຕົວປ່ຽນຂອງລະບົບທີ່ຍັງບໍ່ຮູ້ຄ່າ ແລະ ໄດ້ຈາກການຄິດໄລ່ ACPF. ສຸດທ້າຍ Load bus ຫຼື PQ bus ແມ່ນຮາວໄຟທີ່ມີຕົວຊີມໃຊ້ເຊື່ອມຕໍ່ຢູ່ ຊຶ່ງມີຄວາມຕ້ອງການກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ. ສ່ວນຂະໜາດຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ ແລະ ມຸມແຮງດັນໄຟຟ້າ ຈະເປັນຕົວປ່ຽນຂອງລະບົບທີ່ຍັງບໍ່ຮູ້ຄ່າ ແລະ ໄດ້ຈາກການຄິດໄລ່ ACPF.

ໂດຍທົ່ວໄປການສຶກສາ ACPF ຈະອີງໃສ່ 2 ຮູບແບບຫຼັກຄື: ຮູບແບບຂອດ (Node-based) ແລະ ຮູບແບບງ່າ (Branch based) ຊຶ່ງທັງ 2 ຮູບແບບເປັນຮູບການພື້ນຖານໃນການສ້າງວິທີການຫຼາຍຮູບແບບ ເພື່ອການຄິດໄລ່ ACPF ດັ່ງທີ່ໄດ້ກ່າວມາໃນພາກສະໜີ. ແຕ່ໃນບົດຄວາມສະບັບນີ້ເຮົາຈະຈົງສະເພາະຮູບແບບຂອດ, ທີ່ສາມາດຜັນຂະຫຍາຍໄປສູ່ການສຶກສາ ACOPT. ສົມຜົນການໄຫຼກຳລັງໄຟຟ້າໃນຮູບແບບຂອດສະແດງດ້ວຍ (4) - (5).

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5)$$

ຊຶ່ງ Y_{ij}/θ_{ij} ແມ່ນແອັດມິດແຕນ ແລະ ມຸມຂອງແອັດມິດແຕນ ຂອງສາຍສົ່ງທີ່ເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງຮາວໄຟ i ແລະ j . ໄດ້ຈາກ $\mathbf{Y}_{bus}$ (Glover et al., 2023).

ບັນຫາ ACPF ສາມາດແກ້ໄຂໄດ້ໂດຍນຳໃຊ້ຮູບແບບ Optimization. Optimization ແມ່ນເຕັກນິກທີ່ໃຊ້ໃນການຫາຄ່າຕອບທີ່ດີທີ່ສຸດ ໂດຍການປ່ຽນບັນຫາໃນຊີວິດຈິງເປັນສົມຜົນທາງເລກ ແລ້ວນຳໃຊ້ວິທີການໃນທາງເລກເພື່ອການແກ້ໂຈດບັນຫາດັ່ງກ່າວ. Optimization ຖືກນຳໃຊ້ໃນຫຼາຍຂະແໜງການເຊັ່ນ: ທຸລະກິດ, ເສດຖະກິດ, ວິສະວະກຳ ແລະ ອື່ນໆ (Turan, 2016 & Vilaisarn et al., 2023).

ສຳລັບການນຳໃຊ້ Optimization ໃນການຫາຄ່າຕອບທີ່ດີທີ່ສຸດໃຫ້ກັບໂຈດບັນຫາໃດໜຶ່ງ ຈະຕ້ອງມີ 3 ອົງປະກອບຄື: ໂຈດບັນຫາ (Objective function), ຂໍ້ຈຳກັດຂອງຕົວປ່ຽນ (constraint) ແລະ ຕົວປ່ຽນ (Variable). ທັງ 3 ອົງປະກອບສາມາດຂຽນໃນຮູບຮ່າງລະບົບສົມຜົນໄດ້ດັ່ງນີ້:

$$\max \text{ or } \min f^{OPT}(\mathbf{x}^{OPT}, \mathbf{u}^{OPT}) \quad (6)$$

$$\text{ໂດຍຄຳນຶງເຖິງ:} \\ \mathbf{g}^{OPT}(\mathbf{x}^{OPT}, \mathbf{u}^{OPT}) = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{h}^{OPT}(\mathbf{x}^{OPT}, \mathbf{u}^{OPT}) \leq \text{ or } \geq 0 \quad (8)$$

ສົມຜົນ (6), $f^{OPT}(\mathbf{x}^{OPT}, \mathbf{u}^{OPT})$ ແມ່ນສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ ຫຼື ວັດຖຸປະສົງໂຈດສຶກສາ ຊຶ່ງຂຶ້ນກັບຊຸດຕົວປ່ຽນຕາມ $\mathbf{x}^{OPT}$ ແລະ ຊຸດຕົວປ່ຽນກຳນົດພາວະດີສຸດ $\mathbf{u}^{OPT}$. ໃນນັ້ນ, ຕົວລັບ $\mathbf{x}^{OPT}$ ແລະ $\mathbf{u}^{OPT}$ ຄືຄ່າທີ່ສາມາດປ່ຽນແປງໄດ້ໃນຂອບເຂດທີ່ກຳນົດໄວ້ ເຊິ່ງເຮັດໃຫ້ຄ່າຂອງຕຳລາ $f^{OPT}(\mathbf{x}^{OPT}, \mathbf{u}^{OPT})$ ເພີ່ມຂຶ້ນ ຫຼື ຫຼຸດລົງຕາມວັດຖຸປະສົງໂຈດສຶກສາທີ່ໄດ້ຕັ້ງຂຶ້ນ. ຊຶ່ງຕໍ່ມາ, ສົມຜົນ (7) ແມ່ນສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບເທົ່າທຽມ (equality constraint) ໃນຮູບຮ່າງເວັກເຕີ ຊຶ່ງສອດຄ່ອງກັບ $\mathbf{x}^{OPT}$ ແລະ $\mathbf{u}^{OPT}$. ໃນຂະນະທີ່ສົມຜົນ (8) ແມ່ນສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບບໍ່ເທົ່າທຽມ (inequality constraint).

2.2 ການຕັ້ງໂຈດບັນຫາໃນຮູບແບບ optimization

ສຳລັບການສຶກສາ ACPF ໃນບົດຄວາມນີ້ຈະນຳໃຊ້ວິທີການຕັ້ງໂຈດບັນຫາໃນຮູບແບບການສຶກສາ ACOPT ໂດຍມີພື້ນຖານມາຈາກ Optimization ມາແກ້ບັນຫາ ຊຶ່ງການຕັ້ງໂຈດດັ່ງກ່າວຈະປະກອບດ້ວຍ: ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ ແລະ ຕົວປ່ຽນ (Vilaisarn et al., 2023 & Vilaisarn, 2022). ໃນທາງວິສະວະກຳໂຈດບັນຫາແມ່ນ ເພື່ອການ ຫຼຸດ ຫຼື ເພີ່ມ ຄ່າທີ່ໄດ້ຮັບຈາກສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ ໂດຍຄຳນຶງເຖິງຂໍ້ຈຳກັດການເຮັດວຽກຂອງລະບົບ. ໂຈດສົມຜົນທີ່ຕັ້ງຂຶ້ນສຳລັບການສຶກສາການໄຫຼກຳລັງໄຟຟ້າແມ່ນ ສ້າງຕາມວິທີ Optimization ເພື່ອມາແກ້ບັນຫາຂອງການສຶກສາການໄຫຼ ໂດຍການຂຽນສຸດ Optimization ເຊິ່ງປະກອບດ້ວຍອົງປະກອບຄື: ໂຈດບັນຫາ, ຂໍ້ຈຳກັດ ແລະ ຕົວປ່ຽນ. ສຳລັບການສຶກສາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າໃນຄັ້ງນີ້ພຽງແຕ່ໃຊ້ວິທີ Optimization

ມາເປັນຕົວແກ້ ແຕ່ສໍາລັບໂຈດບັນຫາຈະບໍ່ມີການຫາຄ່າ
ໜ້ອຍສຸດ ຫຼື ຫຼາຍສຸດ. ສະນັ້ນ, ການຕັ້ງໂຈດສົມຜົນສໍາລັບ
ການສຶກສາການໄຫຼຂອງກໍາລັງໄຟຟ້າ ຈຶ່ງຂຽນໄດ້ດັ່ງລຸ່ມນີ້:

$$\min OF = 0 \quad (9)$$

ໂດຍຄໍານຶງເຖິງ:

$$P_i^{HYD} = P_i^{HYD,spec} \quad , \forall i \in \Omega_{HYD} \quad (10)$$

$$V_i = V_i^{HYD,spec} \quad , \forall i \in \Omega_{HYD} \quad (11)$$

$$V_i = V_i^{spec} \quad , \forall i \in \Omega_{PCC} \quad (12)$$

$$\delta_i = 0 \quad , \forall i \in \Omega_{PCC} \quad (13)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} Y_{ij} V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = \begin{pmatrix} P_i^{HYD} + P_i^{PCC} \\ -P_i^L \end{pmatrix} \quad , \forall i \in \Omega_{BUS} \quad (14)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} Y_{ij} V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = \begin{pmatrix} Q_i^{HYD} + Q_i^{PCC} \\ -Q_i^L \end{pmatrix} \quad , \forall i \in \Omega_{BUS} \quad (15)$$

$$I_{k,t}^{mod} = [(V_{i(k)} \angle \delta_{i(k)} - V_{j(k)} \angle \delta_{j(k)}) Y_k \angle \theta_k] / \sqrt{3} \quad , \forall k \in \Omega_{LIN} \quad (16)$$

$$-\infty \leq V_i \leq \infty \quad , \forall i \in \Omega_{Bus} \quad (17)$$

$$-\infty \leq \delta_i \leq \infty \quad , \forall i \in \Omega_{Bus} \quad (18)$$

$$-\infty \leq P_i^{HYD} \leq \infty \quad , \forall i \in \Omega_{HYD} \quad (19)$$

$$-\infty \leq Q_i^{HYD} \leq \infty \quad , \forall i \in \Omega_{HYD} \quad (20)$$

$$-\infty \leq P_i^{PCC} \leq \infty \quad , \forall i \in \Omega_{PCC} \quad (21)$$

$$-\infty \leq Q_i^{PCC} \leq \infty \quad , \forall i \in \Omega_{PCC} \quad (22)$$

$$-\infty \leq I_{k,t}^{mod} \leq \infty \quad , \forall k \in \Omega_{LIN} \quad (23)$$

ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງແມ່ນ ກໍານົດນໍາໃຊ້ສົມ
ຜົນ (9) ສໍາລັບການສຶກສາໃນຄັ້ງນີ້ຈະບໍ່ມີການຫາຄ່າຫຼາຍ
ສຸດ ຫຼື ໜ້ອຍສຸດ. ສະນັ້ນ, ຈຶ່ງຕັ້ງຄ່າເປັນສູນ ເພາະວ່າ
ກໍລະນີນີ້ແມ່ນສຶກສາການໄຫຼຂອງກໍາລັງໄຟຟ້າ ຊຶ່ງການສຶກ
ສາການໄຫຼຂອງກໍາລັງໄຟຟ້າແມ່ນ ບໍ່ໄດ້ມີຈຸດປະສົງຄືກັບ
ການສຶກສາການໄຫຼໃນພາວະດິສຸດ. ສົມຜົນ (10) ເປັນສົມ
ຜົນກໍາລັງໄຟຟ້າຈຶ່ງ ທີ່ຕັ້ງຄ່າໃຫ້ເທົ່າກັບຄ່າທີ່ກໍານົດໄວ້
ສໍາລັບເຄື່ອງກໍານົດໄຟຟ້າຢູ່ຮາວໄຟ i . ສົມຜົນ (11)
ເປັນສົມຜົນກໍານົດຂະໜາດແຮງດັນໄຟຟ້າ ເທົ່າກັບຄ່າທີ່
ກໍານົດໄວ້ສໍາລັບເຄື່ອງກໍານົດໄຟຟ້າຕັ້ງຢູ່ຮາວໄຟ i . ສົມຜົນ
(12) ແລະ (13) ເປັນສົມຜົນກໍານົດຂະໜາດແຮງດັນ
ໄຟຟ້າ ແລະ ມຸມຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ ເທົ່າກັບຄ່າທີ່ກໍານົດໄວ້
ສໍາລັບຮາວໄຟອ້າງອີງ (ຫຼື slack bus). ສົມຜົນ (14) ແລະ
(15) ເປັນສົມຜົນທີ່ສະແດງເຖິງປະລິມານຂອງກໍາລັງໄຟຟ້າ
ຈຶ່ງ ແລະ ກໍາລັງໄຟຟ້າສໍານຶກທີ່ໄຫຼເຂົ້າໃນຮາວໄຟ i ຊຶ່ງຮູ້
ກັນໃນສົມຜົນການໄຫຼຂອງກໍາລັງໄຟຟ້າ. ສົມຜົນ (16)
ເປັນສົມຜົນທີ່ສະແດງເຖິງກະແສໄຟຟ້າທີ່ໄຫຼວຽນຢູ່ໃນສາຍ
ສົ່ງ. ນອກຈາກນີ້, ສົມຜົນ (17) ເຖິງ (23) ເປັນສົມຜົນທີ່

ສ້າງມາເພື່ອເປັນຂອບເຂດ ຫຼື boundary ໃຫ້ແກ່ຄ່າຕົວ
ປ່ຽນ, ໃນກໍລະນີສຶກສາ ACPF ຈະຕັ້ງຄ່າໄວ້ເປັນລົບ ແລະ
ບວກອະສົງໄຂຕາມຮູບແບບຂອງ Optimization.
ເພາະວ່າຄ່າດັ່ງກ່າວນັ້ນສາມາດເປັນຄ່າໃດກໍໄດ້ ໂດຍ
ຖືກລ່ອກ ຫຼື ກໍານົດໂດຍສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (10) ເຖິງ (16)
ເປັນທີ່ຮຽບຮ້ອຍ. ໃນນັ້ນ, ສົມຜົນ (17) ແລະ (18)
ເປັນສົມຜົນທີ່ສ້າງມາເພື່ອກໍານົດຂອບເຂດແຮງດັນໄຟຟ້າ
ແລະ ມຸມຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ i . ສົມຜົນ (19) ແລະ (20)
ກໍານົດຂອບເຂດໃຫ້ກໍາລັງໄຟຟ້າຈຶ່ງ ແລະ ກໍາລັງໄຟຟ້າສໍາ
ນຶກ ສໍາລັບເຄື່ອງກໍານົດໄຟຟ້າ. ສົມຜົນ (21) ແລະ (22)
ກໍານົດຂອບເຂດໃຫ້ກໍາລັງໄຟຟ້າຈຶ່ງ ແລະ ກໍາລັງໄຟຟ້າ
ສໍານຶກທີ່ ນໍາເຂົ້າ/ສົ່ງອອກ ຜ່ານຈຸດເຊື່ອມຕໍ່. ສົມຜົນ (23)
ເປັນສົມຜົນທີ່ສ້າງມາເພື່ອກໍານົດຂອບເຂດໃຫ້ກະແສໄຟຟ້າ
ທີ່ໄຫຼຜ່ານສາຍສົ່ງ.

ຕົວປ່ຽນໄດ້ຈາກການຕັ້ງໂຈດບັນຫາທີ່ສະເໜີໂດຍ
ສົມຜົນ (9) ເຖິງ (23) ແມ່ນສາມາດສັງລວມ ແລະ ສະຫຼຸບ
ໄວ້ໃນຕາຕະລາງ 2.

2.3 ການແກ້ໂຈດບັນຫາໃນຮູບແບບ Optimization

ສົມຜົນ (14) ແລະ (15) ເປັນສົມຜົນທີ່ມີຄຸນລັກສະນະເປັນເສັ້ນໂຄ້ງ ຊຶ່ງສົ່ງຜົນໃຫ້ລະບົບສົມຜົນ (9) ເຖິງ (23) ເປັນລະບົບສົມຜົນທາງຄະນິດສາດທີ່ມີຄຸນລັກສະນະບໍ່ເປັນເສັ້ນຊື່. ເພາະສະນັ້ນການແກ້ໂຈດດັ່ງກ່າວຈຶ່ງຕ້ອງການເຄື່ອງມື (solver) ທີ່ເໝາະສົມກັບຄຸນລັກສະນະດັ່ງກ່າວ. ໃນວຽກງານນີ້, ໄດ້ນຳໃຊ້ຄຳສັ່ງ fmincon ຈາກ MATLAB ທີ່ຢູ່ຮູບການ Interior-point ສຳລັບການແກ້ໂຈດທີ່ມີຄຸນລັກສະນະບໍ່ເປັນເສັ້ນຊື່ (Allam et al., 2018), (MathWorks, n.d.). ຂັ້ນຕອນໃນການແກ້ໂຈດບັນຫາໂດຍໃຊ້ MATLAB ສາມາດສະຫຼຸບໃນຮູບທີ 2.

ຈາກຮູບທີ 2 ຈະເລີ່ມຈາກການກຳນົດຄ່າຖານ ຫຼື ຄ່າ base ເພື່ອປ່ຽນໃຫ້ເປັນລະບົບຫົວໜ່ວຍ ຫຼື per unit (Glover et al., 2023), (Saadat, 1999). ຫຼັງຈາກນັ້ນຈະນຳຂໍ້ມູນເຂົ້າລະບົບໄຟຟ້າເຊັ່ນ: ຄ່າອົມພິແດນສ, ຄ່າກຳນົດຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ, ຕົວຊົມໃຊ້ ແລະ ອື່ນໆ. ຈາກຂໍ້ມູນທີ່ໄດ້, ເຮົາສາມາດສ້າງ Y_{bus} . ຕໍ່ມາ, ກຳນົດຕົວປ່ຽນທີ່ເປັນເວັກເຕີຈາກຕາຕະລາງ 2. ກຳນົດສົມຜົນຈຸດປະສົງ (9). ຕັ້ງຄ່າຂອບເຂດຕ່ຳ ແລະ ສູງສຸດ, ຈາກສົມຜົນ (17) ເຖິງ (23). ຂັ້ນຕອນຖັດໄປ ສ້າງຂໍ້ຈາກັດເທົ່າທຽມຈາກສົມຜົນ (10) – (16). ຫຼັງຈາກເຮົາສ້າງທຸກຢ່າງແລ້ວ, ເຮົາໃຊ້ solver fmincon ເປັນຕົວແກ້ ແລະ ສັງລວມຜົນອອກໃນຂັ້ນສຸດທ້າຍ.

3. ຜົນໄດ້ຮັບ

ເພື່ອປະເມີນໂຈດສົມຜົນການສຶກສາ ACPF, ລະບົບສົ່ງຈ່າຍ 3 ເຟດສແບບດຸ່ນດ່ຽງທີ່ມີ 5 ຮາວໄຟ ແລະ 8 ຮາວໄຟ ທີ່ສະແດງໂດຍຮູບທີ 3 ແລະ 4 ທີ່ມີຄວາມໄກຄຽງກັບໂຄງສ້າງເຄືອຂ່າຍສາຍສົ່ງຂອງ ລັດວິສາຫະກິດໄຟຟ້າລາວ (EDL) ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ສຳລັບການສຶກສາໃນຄັ້ງນີ້. ຂໍ້ມູນຂອງທັງສອງລະບົບແມ່ນສັງລວມໃນຕາຕະລາງ 3 ເຖິງຕາຕະລາງ 10 ທີ່ພົບໄດ້ໃນພາກເອກສານອ້າງອີງ.

ເຫັນວ່າກໍລະນີ 8 ຮາວໄຟເປັນລະບົບມີໜ້ແປງ. ສະນັ້ນ, ການປ່ຽນເປັນລະບົບ per unit ຈຶ່ງຈຳເປັນ. ຂໍ້ມູນຕໍ່ຫົວໜ່ວຍ ແມ່ນສາມາດຊອກມາໄດ້ຈາກການເອົາແຕ່ລະຄ່າຢູ່ໃນ impedance ໄປຫານກັບ Z_{base} ແຕ່ການທີ່ຈະຫານໄດ້ນັ້ນຈະຂຶ້ນກັບພື້ນທີ່ ຈຳເປັນທີ່ຈະໄດ້ມີການແບ່ງພື້ນທີ່ຊຶ່ງລະບົບ 8 ຮາວໄຟນີ້ຈະແບ່ງອອກເປັນສອງພື້ນທີ່: ພື້ນທີ່ທີ 1 ແມ່ນພື້ນທີ່ 500 kV ແລະ ພື້ນທີ່ທີ 2 ແມ່ນພື້ນທີ່

230 kV ຫຼັງຈາກໄດ້ຄ່າທຸກຢ່າງແລ້ວ ສາມາດເອົາໄປແຕ້ມຢູ່ POWERWORLD ແລະ ບ້ອນໃສ່ MATLAB.

ຈາກຮູບທີ 3, ຮາວໄຟທີ 1 ແມ່ນຈຸດແລກປ່ຽນກຳລັງໄຟຟ້າກັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກທີ່ມີຂະໜາດໃຫຍ່. ສະນັ້ນ, ຕາຂ່າຍພາຍນອກຈຶ່ງມີການສະໜັບສະໜູນແຮງດັນໄຟຟ້າ ແລະ ຄວາມຖີ່ໃຫ້ແກ່ຕາຂ່າຍພາຍໃນ. ຈາກນັ້ນເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກທີ່ຕິດຕັ້ງຢູ່ຮາວໄຟ 2 ແລະ 4 ສາມາດຕອບສະໜອງກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກສຳລັບຕາຂ່າຍພາຍໃນ ຫຼື ສາມາດຂາຍກັບຕາຂ່າຍພາຍນອກເມື່ອມີຄວາມເປັນໄປໄດ້. ໃນກໍລະນີຮູບທີ 4, ແຜນວາດວົງຈອນເສັ້ນດ່ຽວຂອງລະບົບ ຈະປະກອບມີ 8 ຮາວໄຟ, 3 ບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ, ໜ້ແປງ 1 ໜ່ວຍ ແລະ ສາຍສົ່ງ 7 ສາຍ. ຮາວໄຟທີ 1 ແມ່ນຈຸດແລກປ່ຽນກຳລັງໄຟຟ້າກັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກທີ່ມີຂະໜາດໃຫຍ່. ສະນັ້ນ, ຕາຂ່າຍພາຍນອກຈຶ່ງມີການສະໜັບສະໜູນແຮງດັນໄຟຟ້າ ແລະ ຄວາມຖີ່ໃຫ້ແກ່ຕາຂ່າຍພາຍໃນ. ຈາກນັ້ນເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກທີ່ຕິດຕັ້ງຢູ່ຮາວໄຟ 4, 5 ແລະ 6 ສາມາດຕອບສະໜອງກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກສຳລັບຕາຂ່າຍພາຍໃນ ຫຼື ສາມາດຂາຍກັບຕາຂ່າຍພາຍນອກ ເມື່ອມີຄວາມເປັນໄປໄດ້.

ລະບົບ 8 ຮາວໄຟນີ້ຈະມີສາຍສົ່ງແບບຂະໜານ (2 ວົງຈອນ) ແຕ່ເພື່ອໃຫ້ງ່າຍໃນການແຕ້ມຢູ່ໃນໂປຼແກຼມ ຈຶ່ງໄດ້ມີການແກ້ໄຂໃຫ້ເປັນວົງຈອນເສັ້ນດຽວ ຊຶ່ງໃນການແປງນັ້ນໄດ້ນຳໃຊ້ວິທີຕໍ່ຂະໜານໂດຍໃຊ້ສູດດັ່ງນີ້:

$$R = (R_1 R_2) / (R_1 + R_2) \quad (24)$$

$$X = (X_1 X_2) / (X_1 + X_2) \quad (25)$$

ຊຶ່ງ, R_1 ແລະ R_2 ແມ່ນຄວາມຕ້ານຂອງວົງຈອນ 1 ແລະ 2 ຂອງສາຍສົ່ງ. X_1 ແລະ X_2 ແມ່ນຄວາມໜ່ຽວນຳຂອງວົງຈອນ 1 ແລະ 2 ຂອງສາຍສົ່ງ.

3.1 ຜົນໄດ້ຮັບຈາກ POWERWORLD (PW)

ຜົນຈາກໂປຼແກຼມ PW ສາມາດເຫັນຄ່າຕ່າງໆໄດ້ແກ່ກຳລັງໄຟຟ້າ (P), ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ (Q) ຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ, ແຮງດັນໄຟຟ້າຢູ່ທີ່ຮາວໄຟ (V) ຫົວໜ່ວຍ kV, ແຮງດັນໄຟຟ້າຕໍ່ຫົວໜ່ວຍ $V(p.u.)$, ມຸມ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກທີ່ໄຫຼໃນສາຍສົ່ງທັງຕົ້ນສາຍກັບປາຍສາຍ, ການສູນເສຍໃນສາຍສົ່ງ ຫຼື ພາສາອັງກິດເອີ້ນວ່າ losses, ກະແສໄຟຟ້າທີ່ສາຍສົ່ງສາມາດຮັບໄດ້ໂດຍຈະ

ເຫັນວ່າເປັນຄ່າ loading %. ທັງໝົດສະແດງດັ່ງໃນຮູບທີ 5 ແລະ 6 ທີ່ພົບໄດ້ໃນພາກເອກສານອ້າງອີງ.

3.2 ປຽບທຽບຜົນລະວ່າງ POWERWORLD ແລະ MATLAB

ຜົນອອກທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການແກ້ໄຂສົມຜົນຂອງການສຶກສາ ACPF ໂດຍໃຊ້ໂປຼແກຼມ MATLAB (ໃນກໍລະນີນີ້ເອີ້ນວ່າ OPT) ໄດ້ຖືກນຳມາປຽບທຽບກັບຜົນໄດ້ຮັບຈາກໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ POWERWORLD. ໂດຍຈະເອົາແຮງດັນໄຟຟ້າ, ມຸມ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກຂອງເຄື່ອງກຳເນີດ, ກະແສໄຟຟ້າໃນສາຍສົ່ງ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກທີ່ສູນເສຍໃນສາຍສົ່ງ ຢູ່ໂປຼແກຼມ PW ມາປຽບທຽບກັບໂປຼແກຼມ MATLAB ຊຶ່ງສະແດງໃນຕາຕະລາງ 11 – 13.

3.3 ຜົນຕ່າງລະວ່າງ POWERWORLD ແລະ MATLAB

ຈາກການແກ້ສົມຜົນ ແລະ ການຈຳລອງໂດຍໂປຼແກຼມ PW, ເພື່ອສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງຄ່າຜິດດ່ຽງສູງສຸດເຮົາໄດ້ຊົມໃຊ້ການຄິດໄລ່ maximum absolute value ຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ, ມຸມ, ການສູນເສຍຂອງກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ, ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ (Vilaisarn & Abdelaziz, 2020). ຊຶ່ງສັງລວມໃນຕາຕະລາງ 15.

ຈາກຕາຕະລາງ 5 ໄດ້ສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງຄ່າຜິດດ່ຽງຢູ່ໃນຂອບເຂດຂອງ 1×10^{-3} ຊຶ່ງເປັນຕົວເລກທີ່ຕໍ່າ ແລະ ຍອມຮັບໄດ້ (Vilaisarn et al., 2021).

4. ວິພາກຜົນ

ຜ່ານມາມີການຊົມໃຊ້ ACPF ໃນຫຼາຍໜ້າວຽກ. ໃນນັ້ນພື້ນຖານເຄື່ອງມືຫຼາຍຊະນິດຖືກນຳໃຊ້ເຂົ້າໃນການສຶກສາດັ່ງກ່າວເຊັ່ນ: NR (Afolabi et al., 2015)(Glover et al., 2023), BFS (Sunisith & Meena, 2014), GS ຫຼື LMA (Lagace et al., 2008). ນອກນັ້ນຍັງມີການຊົມໃຊ້ໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບເຊັ່ນ POWERWORLD ແລະ DIGSILENT ໂດຍທັງໝົດແມ່ນລ້ວນແລ້ວແຕ່ໃຫ້ຜົນຮັບດຽວກັນ. ຊຶ່ງບົດຄວາມນີ້ໄດ້ໃຫ້ຄວາມສຳຄັນເປັນພິເສດຕໍ່ການສຶກສາ ACPF ໂດຍສະເພາະການຕັ້ງໂຈດບັນຫາໃນຮູບການສຶກສາພະວະດິສຸດ ຫຼື optimization model ທີ່ເປັນພື້ນຖານນຳໄປສູ່ການສຶກສາ ACOPF. ໃນນີ້, ໄດ້ມີການປຽບທຽບຜົນໄດ້ຮັບຈາກ OPT ກັບໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບຄື POWERWORLD ໂດຍທີ່ 2 ລະບົບໄຟຟ້າ

(ລະບົບ 5 ຮາວໄຟ ແລະ 8 ຮາວໄຟ) ຖືກນຳໃຊ້ເປັນລະບົບຕົວຢ່າງ. ເບື້ອງຕົ້ນ, ຜົນອອກສະແດງເຖິງການປຽບທຽບພື້ນຖານເຊັ່ນ ແຮງດັນໄຟຟ້າ, ມຸມ, ກຳລັງສູນເສຍ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງໄດ້ຈາກ POWERWORLD ແລະ OPT ສຳລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ ແລະ 8 ຮາວໄຟ. ຈາກຕາຕະລາງ 11 – 14, ຜົນທີ່ໄດ້ຮັບມີຄ່າທີ່ໃກ້ຄຽງກັນ. ນອກນັ້ນ, ຍັງໄດ້ຄິດໄລ່ maximum absolute value ຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ, ມຸມ, ການສູນເສຍຂອງກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ທີ່ໄດ້ຈາກ POWERWORLD ແລະ OPT ທີ່ສະແດງໃນຕາຕະລາງ 15. ຊຶ່ງຜົນດັ່ງກ່າວສາມາດຢັ້ງຢືນຜົນອອກ ແລະ ສ້າງຄວາມໝັ້ນເຊື່ອໃຫ້ຜູ້ອ່ານ.

5. ສະຫຼຸບ

ບົດຄົ້ນຄວ້ານີ້, ໄດ້ລວມເອົາທິດສະດີພື້ນຖານສຳລັບການສຶກສາ ACPF, ສົມຜົນທາງຄະນິດສາດ ແລະ ຜົນໄດ້ຮັບຈາກການຊົມໃຊ້ການສຶກສາ ACPF ໃນຮູບແບບ Optimization. ຊຶ່ງຈະຊ່ວຍໃຫ້ຜູ້ອ່ານສາມາດເຂົ້າໃຈ ແລະ ຮູ້ຕັ້ງໂຈດບັນຫາທາງຄະນິດສາດເປັນຂອງຕົນເອງ ແລະ ໄປຂຽນລະຫັດໂປຼແກຼມ (code) ເພື່ອສາມາດແກ້ການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າໄດ້. ນອກນັ້ນ, ສາມາດຜັນຂະຫຍາຍເພື່ອການສຶກສາ ACOPF ອັນກົງກັບຈຸບະລິ່ງທີ່ກ່າວໄວ້ໃນພາກສະເໜີ. ທ້າຍສຸດ, ຜົນອອກທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການແກ້ໄຂສົມຜົນຂອງການສຶກສາ ACPF ໂດຍໃຊ້ໂປຼແກຼມ MATLAB ໄດ້ຖືກນຳມາປຽບທຽບກັບຜົນໄດ້ຮັບຈາກໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ POWERWORLD. ໃນຂະນະທີ່ລະບົບສິ່ງຈ່າຍ 3 ເຟດສ໌ແບບດຸ່ນດ່ຽງທີ່ມີ 5 ຮາວໄຟ ແລະ 8 ຮາວໄຟ ທີ່ມີຄວາມໃກ້ຄຽງກັບໂຄງສ້າງເຄືອຂ່າຍສາຍສົ່ງຂອງ ລັດວິສາຫະກິດໄຟຟ້າລາວ (EDL) ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ສຳລັບການສຶກສາໃນຄັ້ງນີ້. ຊຶ່ງໄດ້ໃຊ້, ການຄິດໄລ່ maximum absolute value ຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ, ມຸມ, ການສູນເສຍຂອງກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ທີ່ໄດ້ຈາກ POWERWORLD ແລະ OPT ເພື່ອຢັ້ງຢືນຜົນອອກ.

6. ຂໍ້ຂັດແຍ່ງ

ພວກຂ້າພະເຈົ້າໃນນາມນັກຄົ້ນຄວ້າວິທະຍາສາດ ຂໍປະຕິຍານຕີນວ່າ ຂໍ້ມູນທັງໝົດທີ່ມີໃນບົດຄວາມວິຊາການດັ່ງກ່າວນີ້ ແມ່ນບໍ່ມີຂໍ້ຂັດແຍ່ງທາງຜົນປະໂຫຍດກັບ

ພາກສ່ວນໃດ ແລະ ບໍ່ໄດ້ເອື້ອປະໂຫຍດໃຫ້ກັບພາກສ່ວນ
ໃດພາກສ່ວນໜຶ່ງ, ກໍລະນີມີການລະເມີດ ໃນຮູບການໃດ
ໜຶ່ງ ຂ້າພະເຈົ້າມີຄວາມຍິນດີ ທີ່ຈະຮັບຜິດຊອບແຕ່ພຽງຜູ້
ດຽວ.

7. ເອກະສານອ້າງອີງ

- Afolabi, O. A., Ali, W. H., Cofie, P., Fuller, J., Obiomon, P., & Kolawole, E. S. (2015). Analysis of the load flow problem in power system planning studies. *Energy and Power Engineering*, 07(10), 509–523. <https://doi.org/10.4236/epe.2015.710048>
- Allam, M. A., Hamad, A. A., Kazerani, M., & El-Saadany, E. F. (2018). A novel dynamic power routing scheme to maximize loadability of islanded hybrid AC/DC microgrids under unbalanced AC loading. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 5798–5809. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2697360>
- Bounlavong, K., & Phrakonkham, S. (2017). Study on central 2 zone grid stability and effect of grid topology modification. *International Conference On “The Conservation and Development.”*
- Bounseng, B., & Phonpadith, K. (2022). Study on process of converting wind energy to electricity. *Souphanouvong University Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 8(2), 246–255.
- Glover, J. D., S. Sarma, M., J. Overbye, T., & B. Birchfield, A. (2023). *Power system analysis and design*. Cengage.
- Lagace, P. J., Vuong, M. H., & Kamwa, I. (2008). Improving power flow convergence by Newton Raphson with a levenberg-marquardt method. *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, PES, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596138>
- Manoloth, S., & Phrakonkham, S. (2017). Sizing of distributed generation to supply un-electrified villages considering its geographical position and locally renewable energy source availability. *International Conference On “The Conservation and Development.”*
- MathWorks. (n.d.). *Fmincon interior-point algorithm with analytic hessian*. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon-interior-point-algorithm-with-analytic-hessian.html>.
- Saadat, H. (1999). *Power system analysis*. The McGraw-Hill Companies.
- Sunisith, S., & Meena, K. (2014). Backward / forward sweep based distribution load flow method. *International Electrical Engineering Journal*, 5(9), 1539–1544. <http://www.ieejournal.com>
- Turan Gonen. (2016). *Modern Power System Analysis*.
- Vilaisarn, Y. (2022). *AC microgrids analysis, optimization and planning for resilience enhancement AC microgrids analysis , optimization and planning for resilience enhancement*. Laval University.
- Vilaisarn, Y., & Abdelaziz, M. (2020). An inversion-free sparse Zbus power flow algorithm for large-scale droop controlled islanded microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 121(March), 106048. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106048>
- Vilaisarn, Y., Abdelaziz, M., & Cros, J. (2021). Linear three-phase power flow model for autonomous microgrid systems. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2020(1), 50–53. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0019>
- Vilaisarn, Y., Phrakonkham, S., & Inthala, S. (2023). A general guideline on formulating an AC optimal power flow model for optimal operation grid-connected AC transmission network. *Souphanouvong University Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 9(4), 259–270.
- Zhao, T.-Q., Chiang, H.-D., & Koyanagi, K. (2016). Convergence analysis of implicit Z-bus power flow method for general distribution networks with distributed generators. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(2), 412–420. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0679>

ຕາຕະລາງທີ 1: ຊະນິດຂອງຮາວໄຟ ແລະ ຄ່າຕົວປ່ຽນຂອງແຕ່ລະຊະນິດ

ຊະນິດຂອງຮາວໄຟ	ຄ່າຕົວປ່ຽນຂອງແຕ່ລະຊະນິດ			
	P	Q	V	δ
ຮາວໄຟອ້າງອີງ Slack Bus	ບໍ່ຮູ້ຄ່າ	ບໍ່ຮູ້ຄ່າ	ຮູ້ຄ່າ	ຮູ້ຄ່າ
ຮາວໄຟຕົວຊີມໃຊ້ PQ Bus	ຮູ້ຄ່າ	ຮູ້ຄ່າ	ບໍ່ຮູ້ຄ່າ	ບໍ່ຮູ້ຄ່າ
ຮາວໄຟບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ PV Bus	ຮູ້ຄ່າ	ບໍ່ຮູ້ຄ່າ	ຮູ້ຄ່າ	ບໍ່ຮູ້ຄ່າ

ຕາຕະລາງ 2: ຕົວປ່ຽນກຳນົດການສຶກສາການໄຫຼພາວະດິສຸດຂອງໂຈດສົມຜົນ

ລ/ດ	ຕົວປ່ຽນ	ຊຸດ	ຊະນິດ
1	V_i	$\forall i \in \Omega_{Bus}$	$\mathbb{R}$
2	δ_i	$\forall i \in \Omega_{Bus}$	$\mathbb{R}$
3	P_i^{HYD}	$\forall i \in \Omega_{HYD}$	$\mathbb{R}$
4	Q_i^{HYD}	$\forall i \in \Omega_{HYD}$	$\mathbb{R}$
5	P_i^{PCC}	$\forall i \in \Omega_{PCC}$	$\mathbb{R}$
6	Q_i^{PCC}	$\forall i \in \Omega_{PCC}$	$\mathbb{R}$
7	I_k^{mod}	$\forall k \in \Omega_{LIN}$	ຄ່າຕໍ່ເນື່ອງ

ຕາຕະລາງ 3: ຂໍ້ມູນຮາວໄຟສຳລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ

ຮາວໄຟ	ຊື່	ຊະນິດ	P^L	Q^L	P^{HYD}	V^{spec}
ລ/ດ			(MW)	(MVAR)	(MW)	(p.u.)
1	Bus1	Slack	-	-	-	1
2	Bus2	PV	40	20	150	1.02
3	Bus3	PQ	90	30	-	-
4	Bus4	PQ+PV	80	10	100	1
5	Bus5	PQ	90	20	-	-

ຕາຕະລາງ 4: ຂໍ້ມູນສາຍສົ່ງສຳລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ

ສາຍສົ່ງ	ຈາກຮາວໄຟ	ສົ່ງໄປຮາວໄຟ	R	X	I^{max}	L
ລ/ດ	ລ/ດ	ລ/ດ	(Ω/km)	(Ω/km)	(kA)	(km)
1	1	2	0.0176	0.0529	1	150
2	1	3	0.0353	0.1058	1	300
3	2	3	0.0317	0.0952	0.5	250
4	2	4	0.0317	0.0952	0.5	250
5	2	5	0.0265	0.0794	0.5	200
6	3	4	0.0165	0.0496	0.5	80
7	4	5	0.0353	0.1058	1	300

ຕາຕະລາງ 5: ຂໍ້ມູນທົ່ວໄປສຳລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ

ກຳນົດຄ່າຖານ	ຄ່າ	ຫົວໜ່ວຍ
V^{base}	115	kV
S^{base}	100	MVA

ຕາຕະລາງ 6: ຂໍ້ມູນຮາວໄຟສຳລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ຮາວໄຟ	ຊື່	ຊະນິດ	P^L	Q^L	P^{HYD}	V^{spec}
ລ/ດ			(MW)	(MVAR)	(MW)	(p.u.)
1	Bus1	Slack	-	-	-	1
2	Bus2	PQ	-	-	-	-
3	Bus3	PQ	-	-	-	-

4	Bus4	PV	-	-	520	1
5	Bus5	PV	-	-	615	1
6	Bus6	PV	-	-	270	1
7	Bus7	PQ	-	-	-	-
8	Bus8	PQ	127.127	46.95	-	-

ຕາຕະລາງ 7: ຂໍ້ມູນສາຍສົ່ງສໍາລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ສາຍສົ່ງ	ຈາກຮາວໄຟ	ສົ່ງໄປຮາວໄຟ	R	X	I^{max}	L	ແຮງດັນ	ຊະນິດ
ລ/ດ			(Ω /km)	(Ω /km)	(kA)	(km)	(kv)	
1	1	2	0.0063	0.0131	8.6	124	500	ກາງຮາວ
2	2	3	-	0.015	-	1	500/230	ໝໍ້ແປງ
3	2	4	0.0063	0.0131	8.6	130	500	ກາງຮາວ
4	3	5	0.0243	0.0192	2.156	80	230	ກາງຮາວ
5	3	6	0.0243	0.0192	2.156	154	230	ກາງຮາວ
6	3	7	0.0243	0.0192	2.156	1	230	ກາງຮາວ
7	7	8	0.0243	0.0192	2.156	58	230	ກາງຮາວ

ຕາຕະລາງ 8: ຂໍ້ມູນໝໍ້ແປງສໍາລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ລ/ດ	ສາຍສົ່ງ	ຈາກຮາວໄຟ	ສົ່ງໄປຮາວໄຟ	ຊະນິດ	ແຮງດັນ	ກຳລັງ	Z pos.
	ລ/ດ	ລ/ດ	ລ/ດ		(kV)	(MVA)	SC-V (uk) %
1	2	2	3	2-widding	500/230	100	3

ຕາຕະລາງ 9: ຂໍ້ມູນທົ່ວໄປຂອງລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ກຳນົດຄ່າຖານ	ຄ່າ	ຫົວໜ່ວຍ
$V^{base,1}$	500	kV
$V^{base,2}$	230	KV
S^{base}	100	MVA

ຕາຕະລາງ 10: ຂໍ້ມູນທົ່ວໄປຂອງລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ພື້ນທີ່	Z^{base}	I^{base}	ສາຍສົ່ງ	ຈາກຮາວໄຟ	ສົ່ງໄປຮາວໄຟ	R	X
	Ω	kA	ລ/ດ			p.u.	p.u.
1	2500	0.2	1	1	2	0.00000252	0.00000524
-	-	-	2	2	3	0	0.015
2	2500	0.2	3	2	4	0.00000252	0.00000524
2	529	0.4348	4	3	5	0.0000046	0.00000362
1	529	0.4348	5	3	6	0.0000046	0.00000362
2	529	0.4348	6	3	7	0.0000046	0.00000362
2	529	0.4348	7	7	8	0.0000046	0.00000362

ຕາຕະລາງ 11: ແຮງດັນໄຟຟ້າ, ມຸມ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈົງໄດ້ຈາກ PW ແລະ MATLAB ສໍາລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ

ຮາວໄຟ	V		δ		P^{HYD}		Q^{HYD}	
ລ/ດ	(pu)		(deg.)		(pu)		(pu)	
	OPT	PW	OPT	PW	OPT	PW	OPT	PW
1	1.000	1.000	0.000	0	-	-	-	-
2	1.020	1.020	-1.316	-1.320	1.5	1.5	0.944	0.944
3	0.988	0.988	-4.324	-4.324	-	-	-	-
4	1.000	1.000	-3.982	-3.980	1	1	0.459	0.459
5	0.969	0.970	-6.087	-6.090	-	-	-	-

ຕາຕະລາງ 12: ປຽບທຽບກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກສູນເສຍຢູ່ສາຍສົ່ງໄດ້ຈາກສຳລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ

ສາຍສົ່ງ ລ/ດ	OPT		PW	
	p^{loss}	Q^{loss}	p^{loss}	Q^{loss}
	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	0.0047	0.0141	0.0047	0.0141
2	0.0072	0.0216	0.0072	0.0216
3	0.0063	0.0190	0.0063	0.0190
4	0.0043	0.0131	0.0043	0.0131
5	0.0235	0.0705	0.0235	0.0705
6	0.0018	0.0054	0.0018	0.0054
7	0.0028	0.0084	0.0028	0.0084
Total	0.0507	0.1520	0.0506	0.1521

ຕາຕະລາງ 13: ແຮງດັນ, ມຸມ, ກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ສຳນຶກໄດ້ຈາກ PW ແລະ MATLAB ສຳລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ຮາວໄຟ ລ/ດ	V		δ		P^{HYD}		Q^{HYD}	
	(pu)		(deg.)		(pu)		(pu)	
	OPT	PW	OPT	PW	OPT	PW	OPT	PW
1	1	1	0	0	-	-	-	-
2	1.0005	1.0005	0.559	0.560	-	-	-	-
3	0.9794	0.9794	7.046	7.047	-	-	-	-
4	1	1	0.824	0.824	5.20	5.20	-3.282	-3.278
5	1	1	8.224	8.225	6.15	6.15	-0.618	-0.6188
6	1	1	7.813	7.813	2.70	2.70	0.2831	0.2831
7	0.9793	0.9793	7.045	7.045	-	-	-	-
8	0.9749	0.9748	6.959	6.960	-	-	-	-

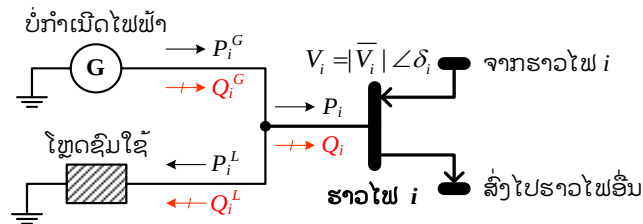
ຕາຕະລາງ 14: ປຽບທຽບກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກສູນເສຍຢູ່ສາຍສົ່ງໄດ້ຈາກສຳລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ສາຍສົ່ງ ລ/ດ	OPT		PW	
	p^{loss}	Q^{loss}	p^{loss}	Q^{loss}
	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
1	0.058	0.120	0.0574	0.120
2	0	0.866	0	0.866
3	0.012	0.026	0.012	0.026
4	0.140	0.111	0.140	0.111
5	0.052	0.041	0.052	0.041
6	0.00008	0.00007	0.00001	0.00001
7	0.005	0.004	0.005	0.004
Total	0.268	1.168	0.267	1.168

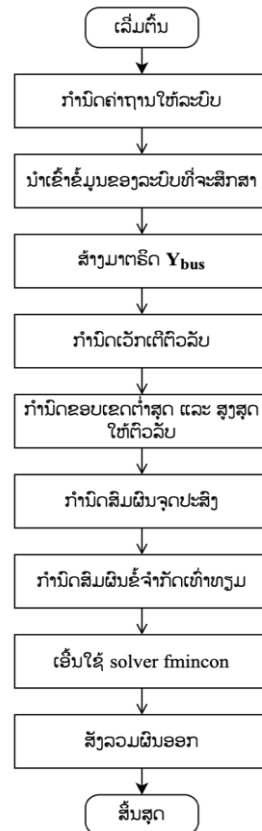
ຕາຕະລາງ 15: ປຽບທຽບກຳລັງໄຟຟ້າຈົງ ແລະ ກຳລັງໄຟຟ້າສຳນຶກສູນເສຍຢູ່ສາຍສົ່ງໄດ້ຈາກສຳລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ

ຕົວກຳນົດ	ຫົວໜ່ວຍ	ກຳລະນິສຶກສາ	
		ສຳລັບລະບົບ 5 ຮາວໄຟ	ສຳລັບລະບົບ 8 ຮາວໄຟ
		OPT and PW	OPT and PW
$\max V $	(pu)	5.58×10^{-4}	5.487×10^{-5}
$\max \delta $	(deg.)	4.4×10^{-3}	9.134×10^{-4}
$\max P_{loss_total} $	(p.u.)	9.04×10^{-5}	1.36×10^{-4}
$\max Q_{loss_total} $	(p.u.)	7.5×10^{-4}	5.57×10^{-5}

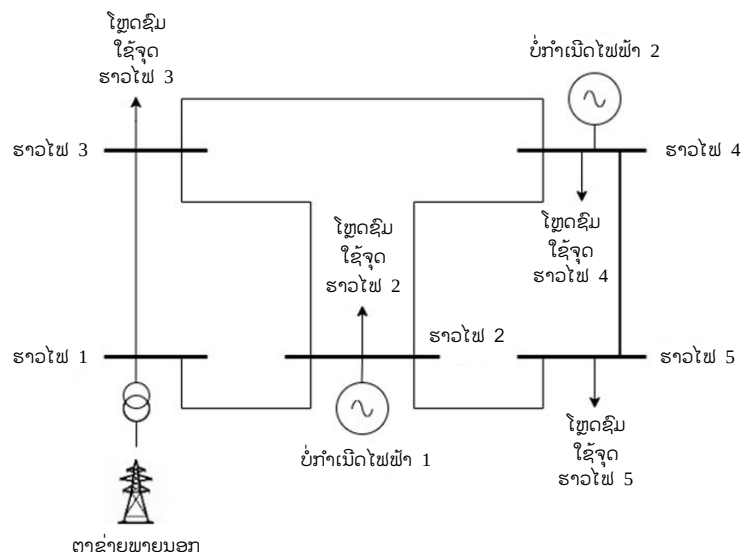
$\max Pg $	(p.u.)	0	0
$\max Qg $	(p.u.)	1.8×10^{-4}	3.766×10^{-3}



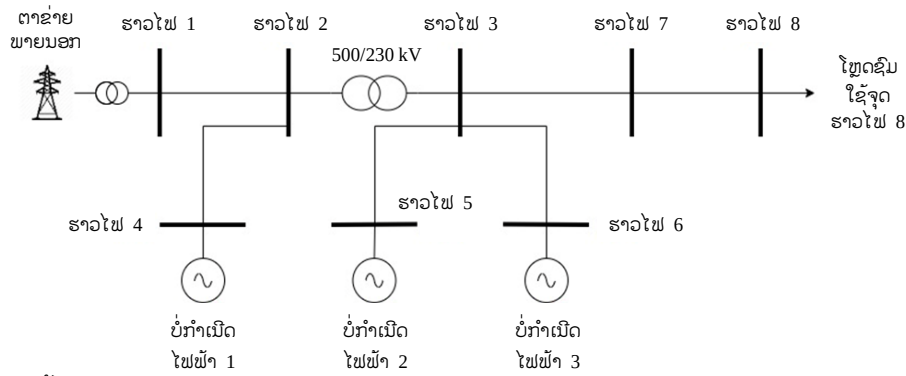
ຮູບທີ 1: ການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ແລະ ຕົວປ່ຽນທາງໄຟຟ້າໃນ 1 ຮາວໄຟ



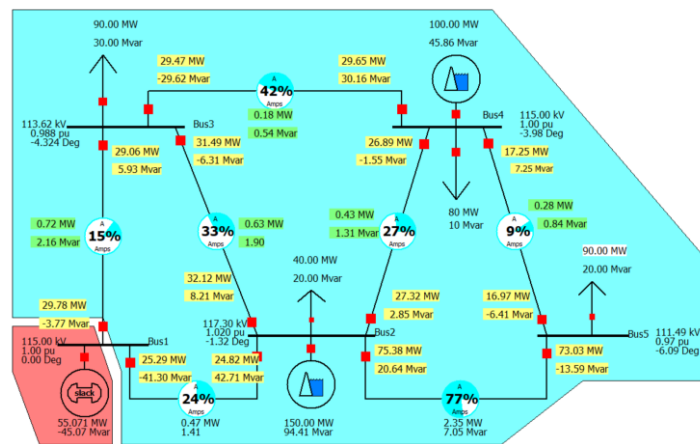
ຮູບທີ 2: ຂັ້ນຕອນການຂຽນການແກ້ໂຈດບັນຫາໃນຮູບແບບ Optimization ໂດຍໃຊ້ fmincon



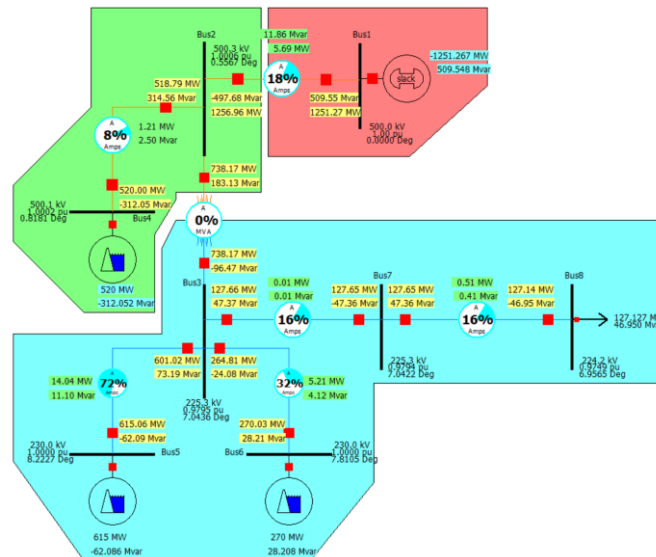
ຮູບພາບທີ 3: ແຜນວາດເສັ້ນດ່ຽວຂອງລະບົບ 5 ຮາວໄຟ



ຮູບທີ 4: ແຜນວາດເສັ້ນດ່ຽວຂອງລະບົບ 8 ຮາວໄຟ



ຮູບທີ 5: ຜົນອອກຂອງລະບົບ 5 ຮາວໄຟຢູ່ໂປຼແກຼມ POWERWORLD



ຮູບທີ 6: ຜົນອອກຂອງລະບົບ 8 ຮາວໄຟຢູ່ໂປຼແກຼມ POWERWORLD