

ບົດຄູ່ມືສໍາລັບການຕັ້ງໂຈດບັນຫາທາງຄະນິດສາດ ເພື່ອຊອກຫາການໄຫຼພາວະດີສຸດຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ໃນລະບົບສິ່ງຈ່າຍໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບທີ່ມີການເຊື່ອມຕໍ່ຕາຂ່າຍຫຼັກ

ຢຸດທະນາລັກ ວິໄລສາຣ*, ແສງປະສິງ ພຣະກອນຄໍາ, ສຸເມກ ອິນທະລາ

ພາກວິຊາ ວິສະວະກຳໄຟຟ້າ, ຄະນະວິສະວະກຳສາດ, ມະຫາວິທະຍາໄລແຫ່ງຊາດລາວ, ສປປ ລາວ

*ຕິດຕໍ່ຜົວຜົນ: ຢຸດທະນາລັກ ວິໄລສາຣ, ພາກວິຊາ ວິສະວະກຳໄຟຟ້າ, ຄະນະວິສະວະກຳສາດ, ມະຫາວິທະຍາໄລແຫ່ງຊາດ, ເບີໂທ: +856 20 9343 7788, ອີເມວ: youthanalack@fe-nuol.edu.la

ບົດຄັດຫຍໍ້

ການສຶກສາ ການໄຫຼພາວະດີສຸດຂອງກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ ຫຼື Alternative Current Optimal Power Flow ຂຽນຫຍໍ້ດ້ວຍ “ACOPF” ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ຢ່າງກວ້າງຂວາງເພື່ອຊອກຫາພາວະດີສຸດຂອງການທຳງານຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ. ຢ່າງໃດກໍຕາມ, ຄວາມເຂົ້າໃຈຕໍ່ກັບການສຶກສາ ACOPF ນັ້ນບໍ່ແມ່ນວຽກທີ່ງ່າຍ ເນື່ອງຈາກຄວາມຕ້ອງການສູງຄວາມຮູ້ດ້ານຄະນິດສາດ ແລະ ຄວາມເຂົ້າໃຈພື້ນຖານຕໍ່ກັບ ACOPF. ອີງຕາມສິ່ງທ້າທາຍເຫຼົ່ານີ້, ບົດຄວາມສະບັບນີ້ໄດ້ສະເໜີບົດຄູ່ມືເພື່ອຊ່ວຍໃຫ້ຜູ້ອ່ານ (ໂດຍສະເພາະ ນັກສຶກສາ ແລະ ຜູ້ອ່ານທົ່ວໄປທີ່ກ່ຽວຂ້ອງ) ເຂົ້າໃຈຢ່າງເລິກເຊິ່ງກ່ຽວກັບແນວຄວາມຄິດຂອງ ACOPF ຈົນເຖິງຄວາມອາດສາມາດໃນການສ້າງລະບົບສົມຜົນທາງຄະນິດສາດເພື່ອການສຶກສາ ACOPF ແລະ ການຊົມໃຊ້ໃນວຽກງານວິສະວະກຳໄຟຟ້າ. ໃນບົດຄວາມສະບັບນີ້ໄດ້ລວມເອົາທິດສະດີພື້ນຖານສໍາລັບການສຶກສາ ACOPF, ການສ້າງສົມຜົນຄະນິດສາດ ແລະ ຜົນໄດ້ຮັບຈາກການຊົມໃຊ້ການສຶກສາ ACOPF. ໃນກໍລະນີນີ້, ການສຶກສາ ACOPF ເພື່ອຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍກຳລັງໄຟຟ້າໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ເຊິ່ງເປັນລະບົບສົມຜົນທາງຄະນິດສາດແບບເສັ້ນໂຄ້ງ ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ເພື່ອເປັນຕົວຢ່າງ. ລະບົບສົມຜົນທາງຄະນິດສາດສໍາລັບການສຶກສາ ACOPF ຖືກແກ້ໄຂໂດຍໃຊ້ໂປຼແກມ MATLAB (ດ້ວຍການນຳໃຊ້ຄຳສັ່ງ fmincon). ເພື່ອການການປະເມີນ, ຜົນອອກທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການແກ້ໄຂສົມຜົນຂອງການສຶກສາ ACOPF ໂດຍໃຊ້ ໂປຼແກມ MATLAB ໄດ້ຖືກນຳມາປຽບທຽບກັບຜົນໄດ້ຮັບຈາກໂປຼແກມສຳເລັດຮູບ DIGSILENT. ໃນຂະນະທີ່ລະບົບສິ່ງຈ່າຍ 3 ເຟດສແບບດຸ່ນດ່ຽງທີ່ມີ 5 ຮາວໄຟ ແລະ ໄດ້ມີການດັດແກ້ໃຫ້ໃກ້ຄຽງກັບໂຄງສ້າງເຄື່ອນຍ້າຍສາຍສິ່ງຂອງ ລັດວິສາຫະກິດໄຟຟ້າລາວ (EDL) ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ສໍາລັບການສຶກສາໃນຄັ້ງນີ້.

ຂໍ້ມູນບົດຄວາມ:
ການສົ່ງບົດ: 28 ກໍລະກົດ 2023
ການປັບປຸງ: 21 ພະຈິກ 2023
ການຕອບຮັບ: 11 ທັນວາ 2023

ຄຳສັບສຳຄັນ: ການໄຫຼພາວະດີສຸດຂອງກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ, ໂປຼແກມ MATLAB, ໂປຼແກມ DIGSILENT, ລະບົບສິ່ງຈ່າຍໄຟຟ້າກຳລັງ, ລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ.

A General Guideline on Formulating an AC Optimal Power Flow Model for Optimal Operation Grid-Connected AC Transmission Network

Youthanalack Vilaisarn*, Sengprasong Phrakonkham, Soumek Inthala

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

*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: Jul 28, 2023

Revised: Nov 21, 2023

Accepted: Dec 11, 2023

Abstract

AC optimal power flow analysis (ACOPF) has been widely used for determining the optimal electrical network operation. Nonetheless, understanding the AC optimal power flow (ACOPF) analysis is not an easy task due to the requirement of mathematical knowledge and understanding the concept of ACOPF itself. According to these challenges, this article proposed the guideline that seeks to help the reader (e.g., students) deeply understand the concepts of ACOPF as well as be able to formulate ACOPF model. The proposed guideline includes the basic theory for ACOPF, formulation and solution. In this work, a nonlinear ACOPF problem for optimal losses reduction for a transmission system has been used as an example application. The ACOPF problem is solved using MATLAB (i.e., fmincon), while comparing the numerical result with those delivered by commercial tools DIGSILENT for evaluating the solution. Finally, the 5-bus balanced system with modification close to the practical EDL transmission network structure, is employed for the test system.

Keywords: Optimal power flow, DIGSILENT, MATLAB, Transmission system, Power System.

1. ພາກສະເໜີ

ໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງກະແສສະຫຼັບ, ກຳລັງ (ກໍ່ຄື ກຳລັງຈິງ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກ) ໄດ້ໄຫຼຜ່ານລະບົບສິ່ງຈ່າຍ ແລະ ລະບົບແຈກຢາຍ ໂດຍມີເປົ້າໝາຍຫຼັກເພື່ອການປະສານລະຫວ່າງຂະແໜງການຜະລິດ ແລະ ຜູ້ຊົມໃຊ້. ຢ່າງໃດກໍ່ຕາມ, ລະບົບໄຟຟ້າໃນປະຈຸບັນມີຂະໜາດໃຫຍ່ ແລະ ສັບສິນ, ການຄຳນວນດ້ວຍມິຫາທິດທາງ ແລະ ປະລິມານກຳລັງທີ່ໄຫຼໃນລະບົບດັ່ງກ່າວຈຶ່ງບໍ່ແມ່ນວຽກທີ່ງ່າຍ.

ເພາະສະນັ້ນ, ວິທີການຄຳນວນທີ່ເອີ້ນວ່າ ການສຶກສາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ (ພາສາອັງກິດ: AC power flow ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ ACPF) ແລະ ACOPF ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ ແລະ ສະໜອງໃຫ້ຜູ້ໃຊ້ສາມາດຄຳນວນຫາທັງ ກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ທີ່ໄຫຼວຽນໃນລະບົບໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ. ໃນປັດຈຸບັນ, ໄດ້ມີການນຳໃຊ້ເຄື່ອງມືຫຼາຍຊະນິດເຂົ້າໃນການສຶກສາ ACPF ດັ່ງເຊັ່ນ: ເຄື່ອງມືສຶກສາການໄຫຼແບບ Newton Raphson (NR) (Afolabi et al., 2015; Afolabi et al., 2015 & Glover et al., 2023), ແບບ Backward-Forward-Sweep (BFS) (Sunisith & Meena, 2014), ແບບ Gauss Seidel (GS) ຫຼື ແບບ Levenberg-Marquardt (LMA) (Lagace et al., 2008). ການວິເຄາະການໄຫຼຂອງກຳລັງ AC ແມ່ນອີງໃສ່ຂໍ້ມູນຕົວຈິງທີ່ຖືກລະບຸໄວ້ກ່ອນ (ເຊັ່ນ: ກຳລັງທີ່ຜະລິດໂດຍບໍ່ກຳນົດໄຟຟ້າ (Zhao et al., 2016)) ແລະ ຄຳ

ນວນຫາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ໂດຍບໍ່ຄຳນຶງເຖິງການໄຫຼພາວະດິສຸດ (Vaccaro & Cañizares, 2018).

ໃນທາງກົງກັນຂ້າມ, ການສຶກສາ ACOPF ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ໃນລຳດັບການຄວບຄຸມຂັ້ນທີສາມ (ເອີ້ນວ່າ tertiary control) ເຊິ່ງກົງກັບຂັ້ນບໍລິຫານການຜະລິດ ແລະ ການໄຫຼໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ. ໃນນັ້ນ, ຈຸດປະສົງຫຼັກຄືການເລືອກຕົວກຳນົດການຄວບຄຸມທີ່ເໝາະສົມ ແລະ ດີທີ່ສຸດສຳລັບຄວບຄຸມການເຮັດວຽກຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າເຊັ່ນ: ການຄວບຄຸມການເຮັດວຽກໃນພາວະດິສຸດຂອງລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງຂະໜາດນ້ອຍ (ພາສາອັງກິດ: Microgrid ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ MG) (Levron et al., 2013) ແລະ ການຄວບຄຸມການເຮັດວຽກໃນພາວະດິສຸດຂອງເຄື່ອນຍາຍລະບົບແຈກຢາຍໄຟຟ້າ (ພາສາອັງກິດ: Distribution network ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ DSN) (Macedo et al., 2015). ເຄື່ອງມືການວິເຄາະ ACOPF ສາມາດກຳນົດຫາການເຮັດວຽກທີ່ດີທີ່ສຸດຂອງເຄື່ອນຍາຍລະບົບໄຟຟ້າໃນສະຖານະການສະເພາະໃດຫນຶ່ງ, ໃນຂະນະທີ່ເຄົາລົບຂໍ້ຈຳກັດດ້ານການເຮັດໂຕຈິງຂອງລະບົບໄຟຟ້ານັ້ນໆ. ເຮົາສາມາດເວົ້າໄດ້ອີກວ່າ, ການສຶກສາ ACOPF ສາມາດຄຳນວນຫາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ຂອງລະບົບ AC ທີ່ດີທີ່ສຸດໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ໂດຍອີງໃສ່ເປົ້າໝາຍສະເພາະເຊັ່ນ: ການຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍຂອງກຳລັງໄຟຟ້າໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ໂດຍຄຳນຶງເຖິງຂໍ້ຈຳກັດການເຮັດວຽກຂອງເຄື່ອນຍາຍດັ່ງກ່າວ (Abdi et al., 2017).

ປະຈຸບັນໃນ ສປປ ລາວ, ການຄົ້ນຄ້ວາໃນຂະແໜງ ການໄຟຟ້າໄດ້ແຕກອອກເປັນຫຼາຍສາຂາເຊັ່ນ: ຄວາມສະ ຖຽນລະ ພາບຂອງລະບົບ (Bounlavong & Phrakonkham, 2017), ວາງແຜນການຕິດຕັ້ງ ບໍ່ ກຳເນີດໄຟຟ້າ (Manoloth & Phrakonkham, 2017), ພະລັງງານລົມ (Bounseng & Phonepadith, 2022) ແລະ ອື່ນໆ. ໃນກໍລະນີເຄື່ອງມືການສຶກສາ ACOPF ແມ່ນໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ເພື່ອວາງແຜນການເຮັດວຽກຂອງຕາຂ່າຍໄຟ ຟ້າ. ເພາະສະນັ້ນ ໃນຂົງເຂດການສຶກສາ (ເວົ້າສະເພາະໃນ ສປປ ລາວ), ການສຶກສາ ACOPF ມີຄວາມຈຳເປັນໃນການບັນຍາຍ ແລະ ສັງລວມເຂົ້າຢູ່ໃນຫຼັກສູດການສຶກສາສອນເຊັ່ນ: ວິຊາ ການວິເຄາະລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ (ພາກວິຊາວິສະວະກຳໄຟຟ້າ, ຄະນະວິສະວະກຳສາດ, ມຊ) ແລະ ອື່ນໆ. ຢ່າງໃດກໍຕາມ, ການສອນ ACOPF ບໍ່ແມ່ນວຽກທີ່ງ່າຍ ເນື່ອງຈາກຄວາມຂາດເຂີນດ້ານເອກະສານອ້າງອີງທີ່ເປັນພາ ສາລາວ. ນອກຈາກນັ້ນ, ຈົນເຖິງປະຈຸບັນ ບົດຮຽນທີ່ກ່ຽວ ຂ້ອງກັບການສຶກສາ ACOPF ຍັງບໍ່ທັນມີການສັງລວມ ເຂົ້າໃນຮ່າງຫຼັກສູດຢູ່ໃນສະຖາບັນການສຶກສາຂອງ ສປປ ລາວ. ອີງຕາມສິ່ງທ້າທາຍເຫຼົ່ານີ້, ບົດຄວາມສະບັບນີ້ໄດ້ເນັ້ນໃສ່ການຊ່ວຍເຫຼືອໃຫ້ນັກສຶກສາເຂົ້າໃຈແນວຄວາມຄິດຂອງການສຶກສາ ACOPF ໂດຍອີງໃສ່ພາກທົດສະດີຜື່ນ ຖານ ຈົນເຖິງວິທີການແກ້ໄຂ. ໃນບົດຄວາມນີ້, ຈຸດປະສົງຫຼັກສາມາດສະຫຼຸບໄດ້ດັ່ງຕໍ່ໄປນີ້:

- ສ້າງເອກະສານທີ່ເປັນພາສາລາວ ເພື່ອນຳສະເໜີການສຶກສາ ACOPF ຕໍ່ນັກສຶກສາ ແລະ ມວນຊົນຜູ້ອ່ານທົ່ວໄປທີ່ກ່ຽວຂ້ອງ;
- ສ້າງບົດແນະນຳໃຫ້ຜູ້ອ່ານສາມາດເຂົ້າໃຈໄດ້ ແລະ ສາມາດອອກແບບສົມຜົນການສຶກສາ ACOPF;
- ສາມາດວິເຄາະຜົນຮັບທາງຕົວເລກທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການແກ້ໂຈດການສຶກສາ ACOPF ແລະ ໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ (ເວົ້າສະເພາະ ໂປຣແກຼມ DIGSILENT).

2. ອຸປະກອນ ແລະ ວິທີການ

2.1 ທົດສະດີຜື່ນຖານການເຮັດວຽກພາວະດິສຸດ

ໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ, ການສຶກສາການເຮັດວຽກພາວະດິສຸດແມ່ນໜຶ່ງຮູບແບບການວິເຄາະໃນສະຖານະຄົງທີ່ (ໃນພາສາອັງກິດເອີ້ນວ່າ steady state), ເຊິ່ງຕິດພັນກັບການດຳເນີນງານ ແລະ ການຄວບຄຸມລະບົບໃນລະດັບຂັ້ນສາມ ຫຼື ລະດັບບໍລິຫານ (ເຊັ່ນ: ການບໍລິຫານການຜະລິດ ຫຼື ລະດັບພະແນກຄວບຄຸມລະບົບແຈກກຽນກຳລັງໄຟຟ້າ (ພາສາອັງກິດ: Distribution system operator, ຂຽນຫຍໍ້ DSO). ເຄື່ອງມືນີ້ຖືກນຳໃຊ້ສຳລັບການກຳນົດການເຮັດວຽກໃຫ້ໄດ້ພາວະດິສຸດ ຂອງຊັບພະຍາກອນການຜະ ລິດ (ບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ), ໂຫຼດຊົມໃຊ້ ແລະ ອຸປະກອນອື່ນໆທີ່ສາມາດຄວບຄຸມໄດ້ໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ, ໂດຍພິຈາ ລະນາດ້ານເຕັກນິກວິຊາການ ແລະ ເສດຖະສາດທີ່ຖືກກຳນົດໄວ້ລ່ວງໜ້າ. ໃນປະຈຸບັນ, ໂຈດບັນຫາການສຶກສາການເຮັດວຽກພາວະດິສຸດ ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້ໂດຍອີງໃສ່ຊະນິດຂອງ

ລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງນັ້ນຄື: ລະບົບໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ AC (ACOPF) ແລະ ໄຟຟ້າກະແສກົງ DC (Direct Current OPF ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ DCOPF). ໂດຍທົ່ວໄປແລ້ວ, ໂຈດບັນຫາທາງຄະນິດສາດຂອງການສຶກສາ ACOPF ສາມາດສ້າງເປັນສົມຜົນທາງຄະນິດສາດແບບເສັ້ນໂຄ້ງ (nonlinear problem) ແລະ ແບບຫວາ (non-convex problem), ເຊິ່ງປະກອບດ້ວຍສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ (objective function) ແລະ ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບເທົ່າທຽມ / ບໍ່ເທົ່າທຽມ (equality / inequality constraint) ທີ່ຈຳຕ້ອງຄຳນຶງເພື່ອຮັບປະກັນການເຮັດວຽກຂອງລະບົບໃຫ້ຖືກຕ້ອງຕາມຄວາມເປັນຈິງ. ໃນກໍລະນີນີ້, ການສຶກສາ ACOPF ຈະສະໜອງສະຖານະການເຮັດຂອງລະບົບໃດໜຶ່ງໃຫ້ຢູ່ໃນພາວະດິສຸດ ໂດຍບໍ່ມີການລະເມີດຂໍ້ຈຳກັດການເຮັດວຽກຂອງລະບົບ ແລະ ອຸປະກອນ. ໂຈດສົມຜົນທາງຄະນິດສາດຜື່ນຖານສຳລັບການສຶກສາ ACOPF ສາມາດຂຽນໄດ້ດັ່ງຕໍ່ໄປນີ້:

$$\max \text{ or } \min f^{OPF}(\mathbf{x}^{OPF}, \mathbf{u}^{OPF}) \quad (1)$$

ໂດຍຄຳນຶງເຖິງ:

$$\mathbf{g}^{OPF}(\mathbf{x}^{OPF}, \mathbf{u}^{OPF}) = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{h}^{OPF}(\mathbf{x}^{OPF}, \mathbf{u}^{OPF}) \leq \text{ or } \geq 0 \quad (3)$$

ສົມຜົນ (1), $f^{OPF}(\mathbf{x}^{OPF}, \mathbf{u}^{OPF})$ ແມ່ນສົມຜົນ

ສະແດງຈຸດປະສົງ ຫຼື ວັດຖຸປະສົງໂຈດສຶກສາ ACOPF ເຊິ່ງຂຶ້ນກັບຊຸດຕົວລັບຕາມ \mathbf{x}^{OPF} ແລະ ຊຸດຕົວລັບກຳນົດພາວະດິສຸດ \mathbf{u}^{OPF} . ຕໍ່ມາ, ສົມຜົນ (2) ແມ່ນສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບເທົ່າທຽມໃນຮູບຮ່າງເວັກເຕີ ເຊິ່ງສອດຄ່ອງກັບ \mathbf{x}^{OPF} ແລະ \mathbf{u}^{OPF} . ໃນຂະນະທີ່ສົມຜົນ (3) ແມ່ນສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບບໍ່ເທົ່າທຽມ. ໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ, ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ $f^{OPF}(\cdot)$ ສາມາດພິຈາລະນາທັງເງື່ອນ ໄຂທາງເສດຖະສາດ ແລະ ດ້ານວິຊາການທີ່ຂຶ້ນກັບຈຸດປະ ສົງ ແລະ ຫົວຂໍ້ຂອງການສຶກສາໃນຂົງເຂດໃດໜຶ່ງ. ໂດຍທົ່ວໄປ, $f^{OPF}(\cdot)$ ສາມາດສະແດງເຖິງວັດຖຸປະສົງດັ່ງເຊັ່ນ: ຫຼຸດກຳລັງສູນເສຍໃນລະບົບໄຟຟ້າ, ຫຼຸດຄ່າບົດເບືອນແຮງດັນ ແລະ ອື່ນໆ. ຫຼັງຈາກນັ້ນ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແມ່ນສະແດງເຖິງຄຸນລັກສະນະ ແລະ ຂອບເຂດຈຳກັດການເຮັດວຽກຂອງລະບົບນັ້ນໆ (Vergara et al., 2019). ໂດຍປົກກະຕິ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບເທົ່າທຽມ ຈະປະກອບດ້ວຍສົມຜົນການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ. ນອກນັ້ນ, ຍັງລວມເຖິງສົມຜົນສະເພາະທີ່ເປັນຕົວແທນຂອງການເຮັດວຽກຂອງອຸປະ ກອນ ແລະ ລະບົບສະເພາະໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າເຊັ່ນ: ລະບົບກັກເກັບພະລັງງານ (ພາສາອັງກິດ: Energy storage system ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ ESS) ແລະ MG. ໃນທາງກົງກັນຂ້າມ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບບໍ່ເທົ່າທຽມຈະຮັບປະ ກັນຕົວລັບ \mathbf{u}^{OPF} ຢູ່ພາຍໃນຂອບເຂດທີ່ກຳນົດໄວ້ເຊັ່ນ: ຄວາມອາດສາມາດໃນການຜະລິດຂອງບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ຂອບເຂດຄວາມອາດສາມາດໃນການເຮັດວຽກຂອງ ESS. ນອກຈາກນັ້ນ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບບໍ່ເທົ່າທຽມ ຍັງຈຳກັດຂອບເຂດຂອງຕົວລັບ \mathbf{x}^{OPF} (ເຊັ່ນ: ແຮງດັນ ແລະ ຄວາມຖີ່ຂອງ

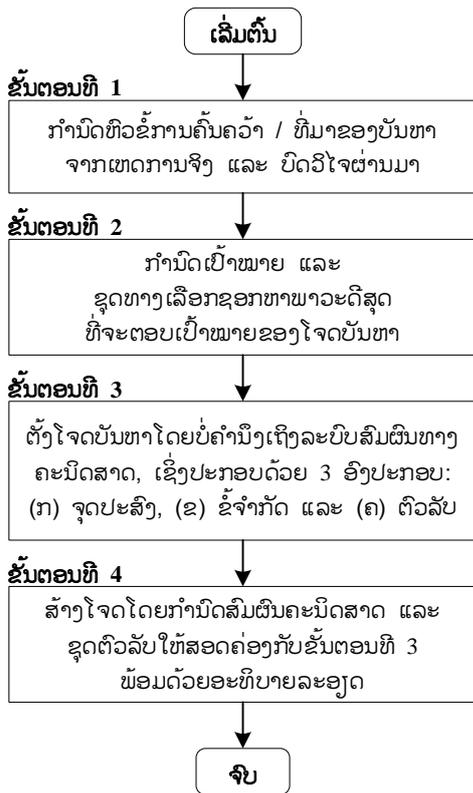
ລະບົບ) ແລະ ອະນຸຍາດໃຫ້ການເຮັດວຽກຂອງລະບົບໄຟຟ້າຢູ່ພາຍໃຕ້ຂອບເຂດທີ່ກຳນົດ ແລະ ເໝາະສົມ.

ສຳລັບພາກສ່ວນຕົວລັບ, ຈະລວມມີຊຸດຕົວລັບ x^{OPF} ແລະ u^{OPF} ເຊິ່ງຂຶ້ນກັບຈຸດປະສົງການສຶກສາສະເພາະ. ໂດຍທົ່ວໄປແລ້ວ, x^{OPF} ແມ່ນຕົວລັບຜົນອອກຂອງໂຈດບັນຫາ ແລະ ສະແດງເຖິງສະພາວະການເຮັດວຽກລະບົບໄຟຟ້າເຊັ່ນ: ຄວາມຖີ່, ແຮງດັນ ແລະ ມຸມຂອງແຮງດັນ, ໃນຂະນະທີ່ u^{OPF} ແມ່ນຕົວລັບທີ່ຈະກຳນົດ ຫຼື ໃຫ້ຜົນໃນພາວະດີສຸດຂອງການເຮັດວຽກຂອງລະບົບໄຟຟ້າ ໂດຍອີງໃສ່ການເພີ່ມ ຫຼື ຫຼຸດຜ່ອນຜົນໄດ້ຮັບຈາກສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ ທີ່ຖືກຕັ້ງໄວ້ຕາມຄວາມປະສົງຂອງໂຈດບັນຫານັ້ນໆ. ໂດຍປົກກະຕິ, u^{OPF} ສາມາດປະກອບດ້ວຍຕົວລັບທີ່ມີ: ລັກສະນະຕໍ່ເນື່ອງ (continuous nature, ເຊັ່ນ: ຄ່າກຳລັງໄຟຟ້າຜະລິດຈາກເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ຄ່າກຳນົດຄວບຄຸມແຮງດັນຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ), ລັກສະນະຖານສອງ (binary nature, ຕົວຢ່າງ: ຂໍ້ຜູກມັດການເຮັດວຽກຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າໃນຂອບເຂດກຳນົດເວລາໃດໜຶ່ງ ແລະ ການຕັດໂຫຼດອອກຈາກລະບົບ), ລັກ ສະນະຈຳນວນເຕັມ (integer nature) ຫຼື ປະສົມປະສານຈາກຮູບແບບລັກສະນະຕົວລັບທີ່ກ່າວມາ. ການປະສົມປະສານລະຫວ່າງລັກສະນະຕົວລັບທີ່ແຕກຕ່າງກັນສາມາດເຮັດໃຫ້ໂຈດບັນຫາ ACOPF ກາຍເປັນສົມຜົນທາງຄະນິດສາດແບບເສັ້ນໂຄ້ງ (ພາສາອັງກິດ: Nonlinear programming ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ NLP). ໃນໂຈດບັນຫາການສຶກສາການເຮັດວຽກພາວະດີສຸດ, ໜຶ່ງໃນເງື່ອນໄຂທີ່ເຮັດໃຫ້ ACOPF ກາຍເປັນສົມຜົນເສັ້ນໂຄ້ງ ແມ່ນສົມຜົນການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ. ຍິ່ງໄປກວ່ານັ້ນ, ການນຳໃຊ້ຕົວລັບທີ່ມີລັກສະນະຈຳນວນເຕັມ / ຖານສອງ ຈະເຮັດໃຫ້ໂຈດບັນຫາກາຍເປັນຮູບຮ່າງລະບົບສົມຜົນທາງຄະນິດສາດແບບເສັ້ນໂຄ້ງໂດຍປະສົມປະສານຄ່າຈຳນວນເຕັມ (ພາສາອັງກິດ: Mixed integer nonlinear programming ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ MINLP).

ໃນກໍລະນີນີ້, ດ້ວຍສົມຜົນການສຶກສາ ACOPF ທີ່ມີຄຸນລັກສະນະຂອງເສັ້ນໂຄ້ງ ຫຼື ແບບຫວາ, ການແກ້ໄຂໂຈດບັນຫາດັ່ງກ່າວ ຈະໄດ້ຜົນໄດ້ຮັບດີສຸດສະເພາະຈຸດເທົ່ານັ້ນ (local optimal solutions) ເຊິ່ງເປັນຜົນໄດ້ຮັບທີ່ນອນຢູ່ໃນຊຸດຄວາມເປັນໄປໄດ້ຂອງຜົນໄດ້ຮັບທີ່ດີສຸດ ແລະ ຍັງບໍ່ແມ່ນຈຸດຜົນໄດ້ຮັບດີສຸດໃນຊຸດຄວາມເປັນໄປໄດ້ (ເອີ້ນວ່າ Global optimal solution). ໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOPF ສາມາດດັດແປງເປັນລະບົບສົມຜົນເສັ້ນໂຄ້ງ, ເຊິ່ງຈະໄດ້ປະສິດທິພາບການຄິດໄລ່ທີ່ດີຂຶ້ນ ແລະ ໄດ້ຮັບຈຸດຜົນໄດ້ຮັບດີສຸດ. ການຫັນປ່ຽນຈາກໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOPF ແບບເສັ້ນໂຄ້ງໄປຫາຮູບແບບເສັ້ນໂຄ້ງແມ່ນສາມາດເຮັດໄດ້ ໂດຍຜ່ານຂະບວນການດັດແກ້ສົມຜົນຕົ້ນສະບັບທີ່ເປັນເສັ້ນໂຄ້ງໃຫ້ເປັນເສັ້ນໂຄ້ງ, ເຊິ່ງຂະບວນການນີ້ເອີ້ນວ່າ “Linearization” ຫຼື ຂະບວນການດັດແກ້ເປັນສົມຜົນເສັ້ນໂຄ້ງ (Abdi et al., 2017) (Vergara et al., 2019). ຢ່າງໃດກໍຕາມ, ການໃຊ້ຂະບວນການດັດແກ້ດັ່ງກ່າວ ສາມາດບັນທອນຄວາມແມ້ນຍຳຂອງຜົນໄດ້ຮັບທາງຕົວເລກ. ເພາະສະນັ້ນ, ຂະບວນການກວດສອບຄວາມແມ້ນຍຳຈຶ່ງມີຄວາມຈຳເປັນ ເພື່ອຮັບປະກັນຜົນໄດ້ຮັບໃຫ້ຢູ່ໃນຂອບເຂດຄວາມແມ້ນຍຳທີ່ຍອມຮັບໄດ້.

2.2 ວິທີການການຕັ້ງໂຈດເພື່ອການສຶກສາ ACOPF

ການຕັ້ງໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOPF ແມ່ນຂຶ້ນກັບຫົວຂໍ້ຂອງການສຶກສາ. ດັ່ງທີ່ໄດ້ສົນທະນາໃນພາກກ່ອນ, ການສ້າງໂຈດບັນຫາການສຶກສາພາວະດີສຸດຈະປະກອບດ້ວຍ: ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ ແລະ ຕົວລັບ. ໃນທາງວິສະວະກຳ, ໂຈດບັນຫາສຳລັບການຫຼຸດຜ່ອນ ຫຼື ເພີ່ມຄ່າທີ່ໄດ້ຮັບຈາກສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງໂດຍຄຳນຶງເຖິງຂໍ້ຈຳກັດການເຮັດວຽກຂອງລະບົບ ນັ້ນແມ່ນໂຈດບັນຫາທີ່ຝົບເຫັນໄດ້ທົ່ວໄປ (Fang & Wang, 2021). ເພື່ອເປັນຄູ່ມືໃຫ້ແກ່ຜູ້ອ່ານ, ຮູບທີ 1 ໄດ້ນຳສະເໜີພາບວາດຂັ້ນຕອນແນະນຳ ສຳລັບການສ້າງໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOPF.



ໃນຂັ້ນຕອນທຳອິດ, ຫົວຂໍ້ຂອງການຄົ້ນຄວ້າ ແລະ ທີ່ມາຂອງບັນຫາໄດ້ຖືກກຳນົດເຊັ່ນ: ສຶກສາການເຮັດວຽກພາວະດິສຸດຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ, ສຶກສາການຈັດຕຳແໜ່ງທີ່ດີທີ່ສຸດຂອງອຸປະກອນໄຟຟ້າສຳລັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າກຳລັງ, ສຶກສາການຈັດໂຄງສ້າງທີ່ດີທີ່ສຸດຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າກຳລັງ ແລະ ອື່ນໆ. ຂັ້ນຕອນນີ້ສາມາດກຳນົດໄດ້ໂດຍການສຳຫຼວດກໍລະນີສຶກສາພາກປະຕິບັດ ແລະ ຄົ້ນຄວ້າໃນບົດວິໄຈຜ່ານມາ. ຍິ່ງໄປກວ່ານັ້ນ, ຂັ້ນຕອນນີ້ສະແດງເຖິງພາບລວມຂອງການຄົ້ນຄວ້າ. ຫຼັງຈາກນັ້ນ, ເປົ້າໝາຍແມ່ນຖືກກຳນົດຢູ່ໃນຂັ້ນຕອນທີ 2. ໃນກໍລະນີນີ້, ເປົ້າໝາຍແມ່ນຈະຖືກໃຊ້ໃນພາຍຫຼັງເພື່ອກຳນົດສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ ແລະ ເນື້ອໃນຕ້ອງຈັດຢູ່ໃນຮູບຮ່າງເພີ່ມ ຫຼື ຫຼຸດເປົ້າໝາຍບາງຢ່າງ. ຍິ່ງໄປກວ່ານັ້ນ, ຊຸດທາງເລືອກຊອກຫາພາວະດິສຸດ ແມ່ນຖືກກຳນົດຢູ່ໃນຂັ້ນຕອນນີ້ເຊັ່ນດຽວກັນ. ຊຸດທາງເລືອກຊອກຫາພາວະດິສຸດ ແມ່ນສິ່ງທີ່ກ່ຽວພັນກັບຕົວລັບກຳນົດພາວະດິສຸດຂອງໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOPF ເຊັ່ນ: ຄ່າກຳລັງຜະລິດຂອງບໍ່ກຳນົດໄຟຟ້າທີ່ເຮັດໃຫ້ການສູນເສຍໃນລະບົບຕໍ່າສຸດ ແລະ ອື່ນໆ. ໃນຂັ້ນຕອນທີ 3, ຈະໄດ້ຂຽນຄຳອະທິບາຍລະອຽດສຳລັບໂຈດບັນຫາ ເຊິ່ງແບ່ງອອກເປັນ 3 ພາກສ່ວນຍ່ອຍປະກອບມີ: ຈຸດປະສົງ, ຂໍ້ຈຳກັດ ແລະ ຕົວລັບ. ໃນກໍລະນີນີ້ ຈະບໍ່ມີການຄຳນຶງ ຫຼື ກຳນົດສົມຜົນທາງຄະນິດສາດ. ທ້າຍສຸດ, ຂັ້ນຕອນທີ 4 ສ້າງຄວາມສົມບູນໃຫ້ກັບຂັ້ນຕອນທີ 3 ໂດຍການສັງລວມເອົາສົມຜົນ

ແລະ ຕົວລັບທີ່ສອດຄ່ອງກັບລາຍລະອຽດທີ່ກຳນົດໃນຂັ້ນຕອນທີ 3. ເພື່ອຄວາມຊັດເຈນ, ການສຶກສາ ACOPF ໃນຕົວຈິງ (ກໍຄື: ການຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ (Acha et al., 2002; Glover et al., 2023) ໄດ້ຖືກເລືອກເປັນຕົວຢ່າງ ແລະ ສະເໜີໃນພາກຕໍ່ໄປ ເຊິ່ງລວມມີ: ການກຳນົດໂຈດບັນຫາ ຈົນເຖິງຜົນໄດ້ຮັບທາງຕົວເລກ.

2.3 ຕົວຢ່າງລະບົບສົມຜົນການສຶກສາ ACOPF

ໃນພາກນີ້, ໄດ້ນຳສະເໜີໂຈດບັນຫາສຳລັບການສຶກສາ ACOPF ເພື່ອຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍໂດຍພິຈາລະນາການສະໜອງກຳລັງຈາກບໍ່ກຳນົດໄຟຟ້າ ແລະ ໄຟຟ້ານຳເຂົ້າຈາກຕາຂ່າຍພາຍນອກ. ໜຶ່ງຂໍ້ສັງເກດສຳຄັນ, ດັ່ງທີ່ໄດ້ກ່າວມາການກຳນົດ ຫຼື ສ້າງໂຈດບັນຫາແມ່ນຂຶ້ນກັບການສຳຫຼວດກໍລະນີສຶກສາພາກປະຕິບັດ ແລະ ຄົ້ນຄວ້າໃນບົດວິໄຈຜ່ານມາ. ໂດຍປັດສະຈາກຂໍ້ມູນດັ່ງກ່າວ, ຜູ້ອ່ານຈະບໍ່ສາມາດສ້າງໂຈດບັນຫາສຳລັບການສຶກສາ ACOPF ຂອງຕົນເອງໄດ້.

ເພື່ອຄວາມຊັດເຈນ, ການອະທິບາຍໂຄງປະກອບສ້າງຂອງໂຈດຕົວຢ່າງແມ່ນຈະອີງໃສ່ຄຳອະທິບາຍ ແລະ ພາບວາດຂັ້ນຕອນແນະນຳການສ້າງໂຈດບັນຫາສຳລັບການສຶກສາ ACOPF ທີ່ສະເໜີໃນພາກທີ 3.

2.3.1 ຂັ້ນຕອນທີ 1: ກຳນົດຫົວຂໍ້, ເປົ້າໝາຍ ແລະ ຊຸດທາງເລືອກ

ໃນລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ, ກຳລັງສູນເສຍແມ່ນສິ່ງທ້າທາຍທີ່ສຳຄັນໂດຍສະເພາະໃນພາກສ່ວນຜູ້ຜະລິດເຊັ່ນ: ກຳລັງສູນເສຍຈະເຮັດໃຫ້ປະສິດທິພາບທາງດ້ານເສດຖະກິດຕໍ່າລົງ. ສຳລັບການນີ້, ການສຶກສາການເຮັດວຽກໃນພາວະດິສຸດ (ໂດຍນຳໃຊ້ເຄື່ອງມືການສຶກສາ ACOPF) ສຳລັບການຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍ ແມ່ນຖືກນຳໃຊ້ເພື່ອເພີ່ມປະສິດທິພາບການເຮັດວຽກຂອງລະບົບໄຟຟ້າ (Kamarposhti et al., 2021). ທາງດ້ານເຕັກນິກ, ການສຶກສາການເຮັດວຽກໃນພາວະດິສຸດສຳລັບການຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍແມ່ນວິທີການກຳນົດຫາຄ່າກຳລັງ (ກໍຄື ກຳລັງຈິງ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກ) ທີ່ໄຫຼວຽນຢູ່ໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ເຊິ່ງສອດຄ່ອງກັບສະພາວະການສູນເສຍໜ້ອຍທີ່ສຸດຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້ານັ້ນໆ. ເພື່ອຫຼຸດ ຜ່ອນການສູນເສຍ, ເຄື່ອງກຳນົດໄຟຟ້າທີ່ຕັ້ງຢູ່ໃນລະບົບສາຍສົ່ງຈຳຕ້ອງຜະລິດກຳລັງໃນປະລິມານໜ້າສົມ ໂດຍການສະໜອງຄ່າກະແສໄຟຟ້າທີ່ໄຫຼຜ່ານອິມພີແດນໃນຕາຂ່າຍໃຫ້ຕໍ່າ ແລະ ລຸດການສູນເສຍໃນສາຍສົ່ງ (Acha et al., 2002; Glover et al., 2023). ສຳລັບການນີ້, ເປົ້າໝາຍຂອງໂຈດບັນຈິງແມ່ນ ການຫຼຸດຜ່ອນ

ການສູນເສຍຂອງກຳລັງໄຟຟ້າໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ. ສຸດທ້າຍ, ຊຸດທາງເລືອກຊອກຫາພາວະດີສຸດ ແມ່ນຂຶ້ນກັບອົງປະກອບທີ່ຄວບຄຸມການໄຫຼໃນຕາຂ່າຍໄຟຟ້ານັ້ນຄື: ກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ທີ່ຜະລິດໂດຍເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ແລກປ່ຽນກັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກຢູ່ຈຸດເຊື່ອມຕໍ່ (ພາສາອັງກິດ: Point of common coupling ຫຼື ຂຽນຫຍໍ້ PCC).

2.3.2 ຂັ້ນຕອນທີ 2: ຕັ້ງໂຈດບັນຫາ

ລາຍລະອຽດສຳລັບການຕັ້ງໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOPF ສາມາດສັງລວມ ແລະ ອະທິບາຍໄດ້ດັ່ງຕໍ່ໄປນີ້:

ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ:

ຫຼຸດຜ່ອນກຳລັງໄຟຟ້າສູນເສຍໃນລະບົບສາຍສົ່ງ, ໂດຍພິຈາລະນາກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ທີ່ຜະລິດຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ແລກປ່ຽນກັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກ.

ຂໍ້ຈຳກັດ:

- ແຮງດັນຄວນເຮັດວຽກພາຍໃນຂອບເຂດຈຳກັດ (ເຊັ່ນ: $\pm 5\%$ ຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າກຳນົດ). ໂດຍທົ່ວໄປ, ຂໍ້ຈຳກັດນີ້ໄດ້ຖືກກຳນົດໂດຍມາດຕະຖານຂອງບໍລິສັດບໍລິການເຄື່ອນຍ້າຍໄຟຟ້າ ເຊັ່ນ EDL;
- ກຳລັງຈິງຜະລິດໂດຍເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ຕ້ອງບໍ່ລະເມີດຄ່າກຳລັງກຳນົດຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້ານັ້ນໆ;
- ການແລກປ່ຽນກຳລັງສຳນຶກໂດຍເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າຕ້ອງຢູ່ໃນຂອບເຂດຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້ານັ້ນໆ;

$$\min_{x_{NLP}} \sum_{i=1}^{n_{bus}} \sum_{j=1}^{n_{bus}} G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (4)$$

ໂດຍຄຳນຶງເຖິງ:

ຂໍ້ຈຳກັດ:

$$V^{min} \leq V_i \leq V^{max}, \forall i \in \Omega_{BUS} \quad (5)$$

$$P_i^{G,min} \leq P_i^G \leq P_i^{G,max}, \forall i \in \Omega_{GEN} \quad (6)$$

$$\chi^{G,min} S^G \leq Q_i^G \leq \chi^{G,max} S^G, \forall i \in \Omega_{GEN} \quad (7)$$

$$-S^{TR} \leq P_i^{PCC} \leq S^{TR}, \forall i \in \Omega_{PCC} \quad (8)$$

$$\chi^{TR,min} S^{SR} \leq Q_i^{PCC} \leq \chi^{TR,max} S^{TR}, \forall i \in \Omega_{PCC} \quad (9)$$

$$V_{i \in \Omega_{PCC}} = V_{PCC}^{spec} \quad (10)$$

$$\delta_{i \in \Omega_{PCC}} = 0 \quad (11)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = (P_i^G + P_i^{PCC} - P_i^L), \forall i \in \Omega_{BUS} \quad (12)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{n_{bus}} Y_{ij} V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = (Q_i^G + Q_i^{PCC} - Q_i^L), \forall i \in \Omega_{BUS} \quad (13)$$

$$I_k^{br} = [(V_i \angle \delta_i - V_j \angle \delta_j) Y_k \angle \theta_k] / \sqrt{3}, \forall k \in \Omega_{LIN} \quad (14)$$

$$\sqrt{\text{real}(I_k^{br})^2 + \text{imag}(I_k^{br})^2} \leq I_k^{max}, \forall k \in \Omega_{LIN} \quad (15)$$

ເຊິ່ງໃນສົມຜົນ (4) – (15), $\Omega_{BUS,PCC,GEN} \& LIN$ ຊຸດຂອງຮາວໄຟ, ຈຸດເຊື່ອມຕໍ່, ບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ສາຍສົ່ງ, ຕາມລຳດັບ. ຕໍ່ມາ, V^{min}/V^{max} ແທນໃຫ້ຂອບເຂດ ຕຳສຸດ/ສູງສຸດ ຂອງແຮງດັນຢູ່ແຕ່ລະຮາວໄຟ, ຫົວໜ່ວຍເປັນ pu

• ການແລກປ່ຽນກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ຢູ່ຈຸດ PCC ບໍ່ຄວນລະເມີດຂອບເຂດຈຳກັດຂອງໝໍ້ແປງທີ່ຕັ້ງຢູ່;

• ຕ້ອງຄຳນຶງເຖິງຄຸນລັກສະນະການເຮັດວຽກຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າເຊັ່ນ: ການດຸ່ນດ່ຽງຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ລະຫວ່າງຜູ້ຜະລິດ ແລະ ຜູ້ຊົມໃຊ້ໃນລະບົບ.

ຕົວລັບ:

ສາມາດແຍກອອກເປັນສອງຊຸດ: ຊຸດຕົວລັບຕາມ ແລະ ຊຸດຕົວລັບກຳນົດພາວະດີສຸດ. ໃນກໍລະນີນີ້, ຕົວລັບຕາມ ແມ່ນ: ແຮງດັນ ແລະ ມຸມຂອງແຮງດັນ ທີ່ຂຶ້ນກັບຜົນໄດ້ຮັບໃນພາວະດີສຸດ. ໃນຂະນະທີ່ກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ຢູ່ຈຸດ PCC ແມ່ນຕົວລັບກຳນົດພາວະດີສຸດຂອງການເຮັດວຽກຂອງຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ.

2.3.3 ຂັ້ນຕອນທີ 3: ລະບົບສົມຜົນ ACOPF

ໃນຂັ້ນຕອນນີ້, ລະບົບສົມຜົນສຳລັບ ACOPF ໄດ້ຖືກກຳນົດຂຶ້ນ ແລະ ສ້າງຄວາມສົມບູນໃຫ້ຂັ້ນຕອນກ່ອນໜ້ານີ້. ໂດຍອີງໃສ່ການສຳຫຼວດບົດວິໄຈຜ່ານມາ ພ້ອມດ້ວຍເນື້ອໃນທີ່ໄດ້ກ່າວມາໃນຂັ້ນຕອນກ່ອນໜ້ານີ້, ລະບົບສົມຜົນສຳລັບ ACOPF ສາມາດກຳນົດຂຶ້ນໄດ້ດັ່ງນີ້:

ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງ

(per unit). $P_i^{G,min}/P_i^{G,max}$ ແມ່ນຂອບເຂດ ຕຳສຸດ/ສູງສູງຂອງກຳລັງຈິງ ທີ່ຜະລິດໂດຍເຂື່ອນໄຟຟ້າ, ຫົວໜ່ວຍເປັນ pu. $\chi^{G,min}/\chi^{G,max}$ ແມ່ນຄ່າສຳປະສິດ ຕຳສຸດ/ສູງສູງ ເພື່ອການຄິດໄລ່ຂອບເຂດກຳລັງສຳນຶກ ທີ່ ແລກປ່ຽນໂດຍເຂື່ອນໄຟຟ້າ. S^G ແລະ S^{TR} ແມ່ນກຳລັງງານຕິດຕັ້ງຂອງ ເຂື່ອນໄຟຟ້າ ແລະ

ໝໍ້ ແປງ, ຕາມລຳດັບ ແລະ ຫົວໜ່ວຍເປັນ pu. $\chi^{TR,min} / \chi^{TR,max}$ ແມ່ນຄ່າສຳປະສິດ ຕໍ່າສຸດ/ສູງສູງ ເພື່ອ ການຄິດໄລ່ຂອບເຂດກຳລັງສຳນຶກທີ່ແລກ ປ່ຽນໃນໝໍ້ແປງ. V_{PCC}^{spec} ແມ່ນແຮງດັນກຳນົດໂດຍຕາຂ່າຍພາຍນອກຜ່ານຈຸດ ເຊື່ອມຕໍ່ PCC. G_{ij} ແທນໃຫ້ຄວາມຊື່ກນຳໄຟຟ້າ ໄຫຼຜ່ານ ສາຍສົ່ງທີ່ເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງຮາວໄຟ i ແລະ j . Y_{ij}/θ_{ij} ແມ່ນ ແອັດມິດແຕນ ແລະ ມຸມຂອງແອັດມິດແຕນ ຂອງສາຍສົ່ງທີ່ ເຊື່ອມຕໍ່ລະຫວ່າງຮາວໄຟ i ແລະ j . I_k^{max} ແມ່ນຂອບເຂດ ກະແສຮັບໄດ້ສູງສຸດຂອງສາຍສົ່ງ. $P_{tot}^{loss} / Q_{tot}^{loss}$ ແທນໃຫ້ກຳ ລັງສູນເສຍລວມ ຂອງພາກສ່ວນກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ. ສ່ວນ ຄວາມໝາຍຂອງຕົວລັບແມ່ນອະທິບາຍໃນຕາຕະລາງທີ 1.

ສົມຜົນສະແດງຈຸດປະສົງແມ່ນກຳນົດໂດຍໃຊ້ສົມຜົນ ທີ່ (4) ແລະ ສະແດງເຖິງສົມຜົນເພື່ອການຫຼຸດຜ່ອນກຳລັງຈິງ ສູນເສຍໃນສາຍສົ່ງທັງຫມົດຂອງລະບົບ. ໃນກໍລະນີນີ້, G_{ij} ສາມາດຄິດໄລ່ໄດ້ຈາກພາກສ່ວນຈິງຂອງ Y_{ij} . ລາຍລະອຽດ ເພີ່ມຕື່ມສຳລັບການຄຳນວນຫາ Y_{ij} ສາມາດພົບໄດ້ໃນ (Glover et al., 2023).

ສຳລັບສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ, ສົມຜົນ (5) ໄດ້ຖືກໃຊ້ເພື່ອຈຳ ກັດແຮງດັນຂອງແຕ່ລະຮາວໄຟໃຫ້ຢູ່ພາຍໃນຂອບເຂດ ມາດຕະຖານ. ສຳລັບບໍ່ກຳນົດໄຟຟ້າ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (6) ແລະ (7) ຈຳກັດກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ທີ່ຜະລິດໂດຍເຄື່ອງກຳ ເນີດໄຟຟ້າໃຫ້ຢູ່ພາຍໃນຂອບເຂດການເຮັດວຽກທີ່ເປັນໄປໄດ້ ເຊິ່ງອີງໃສ່ກຳລັງກຳນົດຂອງເຄື່ອງກຳເນີດໄຟຟ້ານັ້ນໆ. ໃນ

ກໍລະນີຂອງຈຸດ PCC, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (8) ແລະ (9) ຈຳກັດ ການແລກປ່ຽນກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກ ຢູ່ຈຸດ PCC ບໍ່ໃຫ້ ລະເມີດຂອບເຂດຈຳກັດຂອງໝໍ້ແປງທີ່ຕັ້ງຢູ່. ໃນອີກດ້ານໜຶ່ງ , ດັ່ງທີ່ການເຮັດວຽກຢູ່ໃນຮູບແບບການເຊື່ອມຕໍ່ຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ຫຼັກ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (10) ແລະ (11) ກຳນົດຂະໜາດແຮງ ດັນ ແລະ ມຸມຂອງແຮງດັນເທົ່າກັບຄ່າທີ່ກຳນົດໄວ້ສຳລັບຮາວ ໄຟອ້າງອີງ (ຫຼື Slack bus) (Glover et al., 2023). ສົມ ຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (12) ແລະ (13) ສະແດງເຖິງກຳລັງທີ່ໄຫຼເຂົ້າໃນ ຮາວໄຟ i ເຊິ່ງຮູ້ກັນໃນນາມສົມຜົນການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ AC ໃນຮູບແບບສົມຜົນຂອດ (Node-based). ສຸດທ້າຍ, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (14) ສະແດງເຖິງກະແສໄຟຟ້າທີ່ໃຫ້ວຽນຢູ່ ໃນສາຍສົ່ງ ແລະ ຈຳກັດຂອບເຂດຂອງກະແສສູງສຸດໂດຍໃຊ້ ສົມຜົນ (15) ເຊິ່ງເອີ້ນວ່າສົມຜົນກຳລັງສອງ ຫຼື “Quadratic function”.

ໃນໂຈດບັນຫານີ້, ສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດ (5) – (9) ແລະ (15) ແມ່ນຢູ່ໃນຮູບຮ່າງສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບບໍ່ເທົ່າທຽມ, ໃນ ຂະນະທີ່ (10) – (14) ແມ່ນຢູ່ໃນຮູບຮ່າງສົມຜົນຂໍ້ຈຳກັດແບບ ເທົ່າທຽມ. ຍິ່ງໄປກວ່ານັ້ນ, ເຮົາສາມາດສັງເກດໄດ້ວ່າ, ລະບົບ ສົມຜົນການສຶກສາ ACOPF ເລີ່ມແຕ່ (4) – (15) ແມ່ນຮູບ ແບບລະບົບສົມຜົນແບບເສັ້ນໂຄ້ງເນື່ອງຈາກເຫດຜົນດັ່ງນີ້:

- ພາກສ່ວນເລຂາຄະນິດ ແລະ ການຄຸນລະຫວ່າງຕົວລັບທີ່ ພົບໃນສົມຜົນ (4), (12) ແລະ (13);
- ສົມຜົນ (15) ເປັນສົມຜົນກຳລັງສອງ ແລະ ມີຄຸນ ລັກສະນະເສັ້ນໂຄ້ງ.

ຕົວລັບ: ຊຸດຕົວລັບຂອງສົມຜົນທາງຄະນິດສາດແບບເສັ້ນໂຄ້ງ (ກໍ່ຄື X^{NLP}) ໄດ້ສັງລວມ ແລະ ສະຫຼຸບໄວ້ໃນຕາຕະລາງທີ 1.

ຕາຕະລາງທີ 1: ຕົວລັບຕາມ ແລະ ຕົວລັບກຳນົດພາວະດີສຸດຂອງໂຈດສົມຜົນ ACOPF

ລ/ດ #	ຕົວລັບ	ຄວາມໝາຍ	ສະນິດ \mathbb{R} : ຄ່າຕໍ່ເນື່ອງ	ຊຸດ $\forall i, k \in$
1	V_i	ລະດັບແຮງດັນທີ່ຮາວໄຟ i	\mathbb{R}	Ω_{BUS}
2	δ_i	ຄ່າມຸມທີ່ຮາວໄຟ i	\mathbb{R}	Ω_{BUS}
3	P_i^G	ກຳລັງຈິງ ຜະລິດໂດຍບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າທີ່ຮາວໄຟ i	\mathbb{R}	Ω_{GEN}
4	Q_i^G	ກຳລັງສຳນຶກ ຜະລິດໂດຍບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າທີ່ຮາວໄຟ i	\mathbb{R}	Ω_{GEN}
5	P_i^{PCC}	ກຳລັງຈິງ ແລກປ່ຽນທີ່ຮາວໄຟ i	\mathbb{R}	Ω_{PCC}
6	Q_i^{PCC}	ກຳລັງສຳນຶກ ແລກປ່ຽນທີ່ຮາວໄຟ ຕໍ່ i	\mathbb{R}	Ω_{PCC}
7	I_k^{br}	ກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກທີ່ໄຫຼເຂົ້າຮາວໄຟ i	\mathbb{R}	Ω_{LIN}

3. ຜົນໄດ້ຮັບ

ເພື່ອປະເມີນໂຈດສົມຜົນການສຶກສາ ACOPF, ລະບົບສິ່ງຈ່າຍ 3 ເຜດສແບບດຸ່ນດ່ຽງທີ່ມີ 5 ຮາວໄຟໄດ້ ຖືກນຳໃຊ້. ໃນເບື້ອງຕົ້ນ, ຕາຂ່າຍນີ້ໄດ້ຖືກພົບເຫັນໃນ (Acha et al., 2002), ແຕ່ໃນບົດຄວາມນີ້ຕາຂ່າຍດັ່ງກ່າວໄດ້

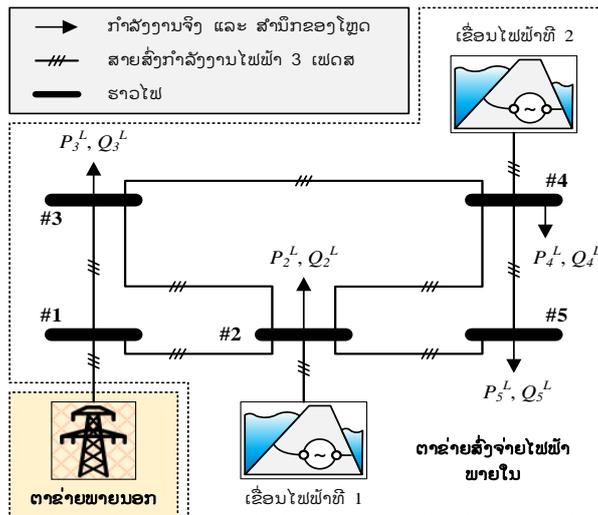
ມີການດັດແກ້ໃຫ້ໃກ້ຄຽງກັບໂຄງສ້າງຕາຂ່າຍສາຍສົ່ງ 115 kV ຂອງລັດວິສາຫະກິດໄຟຟ້າລາວ (EDL). ຮູບທີ 2 ສະແດງໃຫ້ເຫັນລະບົບດັ່ງກ່າວ. ໃນກໍລະນີນີ້, ຮາວໄຟ #1 ແມ່ນຈຸດ PCC ເຊິ່ງມີການແລກປ່ຽນກຳລັງກັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າ ພາຍນອກທີ່ມີຂະໜາດໃຫຍ່ (ເຊັ່ນ: ຕາຂ່າຍໄຟຟ້າປະເທດ

ເຜື້ອນບ້ານ). ສະນັ້ນ, ຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກຈຶ່ງມີຄວາມສາມາດໃນການສະໜັບສະໜູນແຮງດັນ ແລະ ຄວາມຖີ່ (50 Hz) ໃຫ້ແກ່ຕາຂ່າຍພາຍໃນ. ຈາກນັ້ນ, ເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກທີ່ຕິດຕັ້ງຢູ່ຮາວໄຟ #2 ແລະ #4 ແລະ ສາມາດສະໜອງ P ແລະ Q ສຳລັບຕາຂ່າຍພາຍໃນ ແລະ/ຫຼື ຂາຍໃຫ້ກັບຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກ ເມື່ອມີຄວາມເປັນໄປໄດ້. ຂໍ້ມູນທີ່ຈຳເປັນທັງໝົດແມ່ນໄດ້ສະຫຼຸບໃນຕາຕະລາງ 2, 3, 4 ແລະ 5.

ໃນບົດຄວາມນີ້, ສົມຜົນການສຶກສາ ACOPF ແມ່ນໄດ້ຮັບຈາກ ໂປຼແກຼມ MATLAB (ດ້ວຍການນຳໃຊ້ຄຳສັ່ງ fmincon), ໃນຂະນະທີ່ໂປຼແກຼມສຳເລັດຮູບ DIGSILENT (Factory, 2023) ຈຳລອງກໍລະນີສຶກສາເພື່ອການປຽບທຽບ. ໃນການຄົ້ນຄວ້ານີ້, ສາມສະຖານະການໄດ້ຖືກສ້າງຂຶ້ນສຳລັບກໍລະນີສຶກສາ (ກໍຄື: ກໍລະນີສຶກສາທີ 1, ກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ ກໍລະນີສຶກສາທີ 2B). ໃນນັ້ນ, ກໍລະນີສຶກສາທີ 1: ເຂື່ອນໄຟຟ້າທັງສອງເຂື່ອນຖືກຕັດການເຊື່ອມຕໍ່ຈາກຕາຂ່າຍພາຍໃນ; ກໍລະນີສຶກສາທີ 2A: ມີພຽງແຕ່ເຂື່ອນໄຟຟ້າຕັ້ງຢູ່ຮາວໄຟ #2 ທີ່ເຊື່ອມຕໍ່ ແລະ ສະໜອງໃຫ້ຕາຂ່າຍສິ່ງຈ່າຍ; ແລະ ກໍລະນີ

ສຶກສາທີ 2B: ທັງສອງເຂື່ອນໄຟຟ້າເຊື່ອມຕໍ່ ແລະ ສະໜອງໃຫ້ຕາຂ່າຍສິ່ງຈ່າຍ. ສຳລັບກໍລະນີສຶກສາທີ 1, ການສຶກສາ ACOPF ແບບທົ່ວໄປ (Glover et al., 2023; Saadat, 1999) ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້, ຍ້ອນມີພຽງແຕ່ໜຶ່ງຊັບພະຍາກອນທີ່ສະໜອງກຳລັງໃຫ້ຕາຂ່າຍສິ່ງຈ່າຍພາຍໃນ (ກໍຄື: ກຳລັງນຳເຂົ້າຢູ່ຈຸດ PCC) ແລະ ບໍ່ຈຳເປັນຕ້ອງຊົມໃຊ້ການສຶກສາ ACOPF.

ກ່ອນອື່ນໝົດ, ສຳລັບການສຶກສາ ACOPF ຜົນໄດ້ຮັບຂອງການເຮັດວຽກພາວະດີສຸດ ແມ່ນໄດ້ຈາກການແກ້ໄຂລະບົບສົມຜົນ (4) – (15) ແລະ ເຮັດການຈຳລອງໂດຍໂປຼແກຼມ DIGSILENT ສຳລັບກໍລະນີສຶກສາ ທີ່ໄດ້ກ່າວມາຂ້າງເທິງ (ກໍຄື: ກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ ກໍລະນີສຶກສາທີ 2B). ສຳລັບການນີ້, ຮູບທີ 3 ສະແດງໃຫ້ເຫັນກຳລັງຈິງ ແລະ ສຳນຶກສຳລັບ: ໂຫຼດຊົມໃຊ້, ການຜະລິດ ແລະ ການແລກປ່ຽນທີ່ຈຸດ PCC. ນອກຈາກນັ້ນ, ຕາຕະລາງ 6 ສະແດງຜົນໄດ້ຮັບໃນພາວະດີສຸດ ເຊິ່ງປະກອບດ້ວຍ: ແຮງດັນຕໍ່າ / ສູງສຸດ, ກຳລັງງານສູນເສຍ ແລະ ກະແສໄຟຟ້າສູງສຸດ.



ຮູບພາບທີ 2: ລະບົບສິ່ງຈ່າຍ 3 ເຜດສຕຸ່ນດ່ຽງທີ່ມີ 5 ຮາວໄຟໂດຍໃກ້ຄຽງກັບໂຄງສ້າງຕາຂ່າຍສາຍສິ່ງ 115 kV ຂອງລັດວິສາຫະກິດໄຟຟ້າລາວ (EDL)

ຕາຕະລາງທີ 2: ຂໍ້ມູນສຳລັບຮາວໄຟ

ລ/ດ	P_L	Q_L
ຮາວໄຟ	(MW)	(MVAR)
1	-	-
2	40	20
3	90	30
4	80	10
5	90	20

ຕາຕະລາງທີ 3: ຂໍ້ມູນສຳລັບສາຍສິ່ງ

ລ/ດ	fb	tb	R	X	I^{max}	ໄລຍະ
-----	----	----	---	---	-----------	------

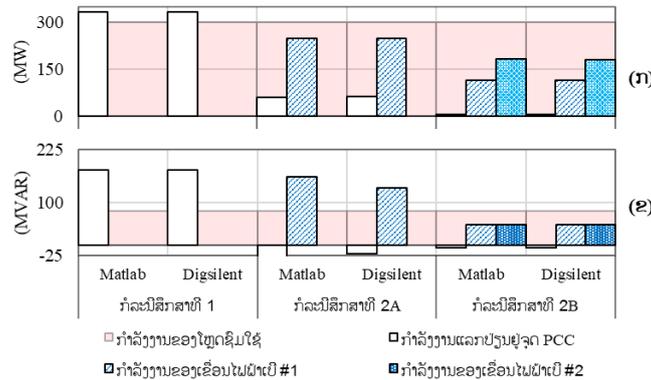
ສາຍສົ່ງ	no.	no.	(Ω/km)	(Ω/km)	(kA/ Φ)	(km)
1	1	2	0.0176	0.0529	1.00	150
2	1	3	0.0353	0.1058	1.00	300
3	2	3	0.0317	0.0952	0.50	250
4	2	4	0.0317	0.0952	0.50	250
5	2	5	0.0265	0.0794	0.50	200
6	3	4	0.0165	0.0496	0.50	80
7	4	5	0.0353	0.1058	1.00	300

ຕາຕະລາງທີ 4: ຂໍ້ມູນກຳນົດສຳລັບບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ ແລະ ຫໍ້ແປງ

ລ/ດ ສາຍສົ່ງ	S^{rated} (MVA)	p^{min}/p^{max}	χ^{min}/χ^{max}	Mode
Generators	2	250	$0/S^{rated}$	-0.8/0.8 PQ
	4	200	$0/S^{rated}$	-0.6/0.6 PQ
Transformer	1	500	$-S^{rated}/S^{rated}$	-0.6/0.6 PQ

ຕາຕະລາງທີ 1: ຂໍ້ມູນທົ່ວໄປ

ຄ່າກຳນົດ	ຫົວໜ່ວຍ	ຄ່າ
V_{PCC}^{spec}	p.u.	1.00
V^{min}/V^{max}	p.u.	0.95/1.05
S_{base}	MVA	100
V_{base}	kV	115



ຮູບພາບທີ 1: ພາບສະແດງປະລິມານກຳລັງໄຟຟ້າສຳລັບ ກໍລະນີທີ 2A ແລະ ກໍລະນີທີ 2B ໄດ້ຈາກ MATLAB ແລະ DIGSILENT: (ກ) ກຳລັງຈິງ (ຂ) ກຳລັງສຳນຶກ

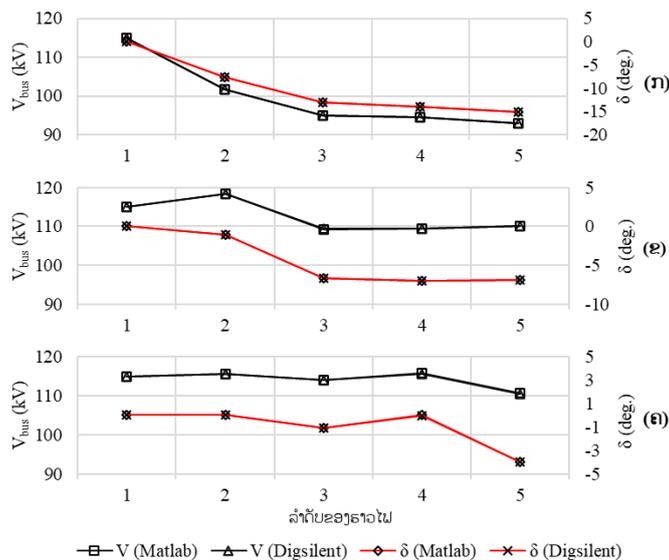
ຕາຕະລາງທີ 2: ຜົນໄດ້ຮັບໃນພາວະດີສຸດສຳລັບກໍລະນີສຶກສາທີ 1, 2A ແລະ 2B

ຕົວກຳນົດ	ຫົວໜ່ວຍ	ກໍລະນີສຶກສາ					
		1		2A		2B	
		Mat.	Digs.	Mat.	Digs.	Mat.	Digs.
$\min\{V_i\}$	kV	93.0	93.0	109.3	109.3	110.6	110.5
$\max\{V_i\}$	kV	115.0	115.0	118.3	118.4	115.8	115.7
P_{tot}^{loss}	MW	32.3	32.3	11.8	11.8	3.2	3.2
Q_{tot}^{loss}	MVAR	96.9	96.9	35.4	35.5	9.5	9.5
$\max\{ I_k^{br} \}$	kA	1.353	1.353	0.493	0.493	0.381	0.377

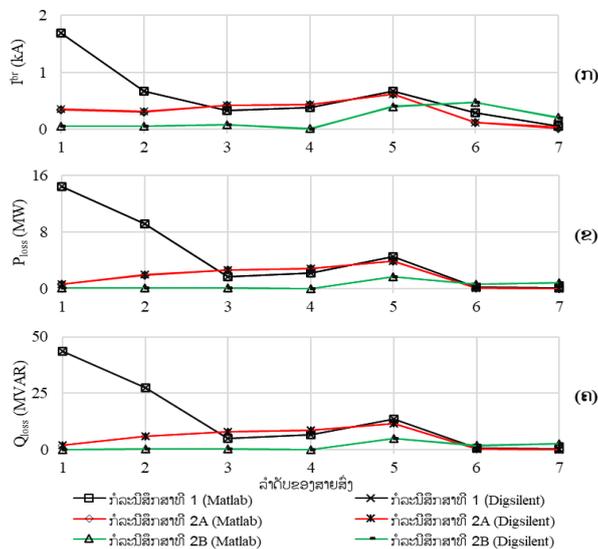
ດັ່ງທີ່ ຄາດໄວ້, ຜົນໄດ້ຮັບໂດຍ MATLAB ແລະ DIGSILENT ແມ່ນແຕກຕ່າງກັນເລັກນ້ອຍ ຍ້ອນທັງສອງຮູບ ການສະໜອງຜົນອອກບົນພື້ນຖານໂຈດບັນຫາດຽວກັນ. ໃນ ກໍລະນີສຶກສາທີ 1, ເນື່ອງຈາກການຂາດແຄນເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກ

ທີ່ຮາວໄຟ #1 ແລະ #2, ກຳລັງຊົມໃຊ້ບວກກັບກຳລັງສູນເສຍ ແມ່ນໄດ້ຮັບການສະໜອງຢ່າງເຕັມສ່ວນ ໂດຍກຳລັງຈົງ ແລະ ສຳນຶກ ທີ່ນຳເຂົ້າຈາກຕາຂ່າຍໄຟຟ້າພາຍນອກ. ໃນຂະນະທີ່ກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ 2B ກຳລັງນຳເຂົ້າ ແລະ ຜະລິດມີຄ່າປະລິມານ ທີ່ໃຫ້ຜົນກົງກັບການເຮັດວຽກພາວະດີສຸດ ໂດຍສິ່ງຜົນໃຫ້ກຳລັງຈົງສູນເສຍໃນລະບົບຕໍ່າ ດັ່ງທີ່ເຫັນໄດ້ໃນຕາຕະລາງ 6. ໃນແງ່ຂອງແຮງດັນໄຟຟ້າ, ແຮງດັນໄຟຟ້າຕໍ່າສຸດທີ່ຝົບເຫັນແມ່ນ 93 kV ໃນກໍລະນີສຶກສາທີ 1 ເມື່ອທຽບກັບກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ 2B. ຫຼັງຈາກນັ້ນ, ແຮງດັນສູງສຸດແມ່ນ 115 kV ສຳລັບກໍລະນີສຶກສາທີ 1 ເຊິ່ງກຳນົດໂດຍແຮງດັນທີ່ຈຸດ PCC. ໃນຂະນະທີ່ກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ 2B ແຮງດັນສູງສຸດແມ່ນ ~ 118.3 kV ຝົບທີ່ຮາວໄຟ #2 ແລະ 115.8 kV ຝົບທີ່ຮາວໄຟ #5, ຕາມລຳດັບ. ສຳລັບກະແສໄຟຟ້າ, ກະແສສູງສຸດມີຄ່າຕໍ່າສຸດໃນກໍລະນີສຶກສາທີ 2B, ຕິດຕາມດ້ວຍກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ ກໍລະນີສຶກສາທີ 1.

ແຮງດັນ ແລະ ມຸມສຳລັບກໍລະນີສຶກສາແມ່ນສະແດງໃນຮູບທີ 4. ດັ່ງທີ່ເຫັນໄດ້ໃນກໍລະນີທີ 1, ແຮງດັນໄຟຟ້າຕິກຕາມສາຍສິ່ງ ແລະ ເຮັດໃຫ້ຄ່າແຮງດັນລຸດລົງນັບຈາກຈຸດ PCC ໄປຫາພາກສ່ວນລຸ່ມ. ສາເຫດແມ່ນເນື່ອງມາຈາກມີພຽງໜຶ່ງຈຸດສະໜອງໄຟຟ້າ (ກໍຄື: ກຳລັງນຳເຂົ້າຢູ່ຈຸດ PCC) ແລະ ເຮັດໃຫ້ການໄຫຼວຽນຂອງກະແສເປັນທິດທາງດຽວນັບຈາກຈຸດ PCC ໄປສູ່ຈຸດສຸດທ້າຍຂອງຕາຂ່າຍ. ໃນທາງກົງກັນຂ້າມ, ໃນກໍລະນີສຶກສາທີ 2A ແລະ 2B ແຮງດັນໄດ້ຖືກສະໜັບສະໜູນໂດຍສະຖານີການຜະລິດ (ກໍຄື ເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກ #1 ແລະ #2). ສຳລັບການນີ້, ອີງຕາມສົມຜົນ (14) ກະແສໄຟຟ້າທີ່ໄຫຼຜ່ານສາຍສິ່ງຈຶ່ງຕໍ່າເມື່ອທຽບກັບກໍລະນີສຶກສາ 1 ແລະ ສິ່ງຜົນເຮັດໃຫ້ກຳລັງສູນເສຍຕໍ່າ. ຮູບທີ 5 ສະແດງໃຫ້ເຫັນ: ກະແສໄຟຟ້າໄຫຼໃນສາຍສິ່ງ, ກຳລັງຈົງສູນເສຍໃນລະບົບ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກສູນເສຍໃນລະບົບ.



ຮູບພາບທີ 4: ແຮງດັນ ແລະ ມຸມແຮງດັນສຳລັບ: (ກ) ກໍລະນີສຶກສາທີ 1 (ຂ) ກໍລະນີສຶກສາ 2A (ຄ) ກໍລະນີສຶກສາ 2B



ຮູບພາບທີ 2: ກະແສໄຫຼໃນສາຍສົ່ງ ແລະ ກຳລັງສູນເສຍສຳລັບກໍລະນີສຶກສາທີ 1, 2A ແລະ 2B: (ກ) ກະແສໄຫຼໃນສາຍສົ່ງ (ຂ) ກຳລັງຈິງ ສູນເສຍໃນລະບົບ (ຄ) ກຳລັງສຳນຶກ ສູນເສຍໃນລະບົບ

4. ວິພາກຜົນ

ປະຈຸບັນ, ມີການຄົ້ນຄວ້າຢ່າງແຜ່ຫຼາຍໃນຂະແໜງການທີ່ກ່າວມາໃນບົດຄວາມສະບັບນີ້. ໂດຍສະເພາະວິທີການ ACPF ທີ່ໄດ້ນຳສະເໜີໂດຍ (Afolabi et al., 2015), (Glover et al., 2023), (Sunisith & Meena, 2014) ແລະ (Lagace et al., 2008). ນອກນັ້ນກໍຍັງມີການຊົມໃຊ້ ACPF ເຂົ້າໃນການວິເຄາະສະເພາະຈຸດເຊັ່ນ: ຄຳນວນຫາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ໂດຍບໍ່ຄຳນຶງເຖິງການໄຫຼພາວະດິສຸດ (Vaccaro & Cañizares, 2018). ແຕ່ວິທີການດັ່ງກ່າວນັ້ນໃຊ້ສະເພາະການສຶກສາ ACPF ເທົ່ານັ້ນ ແລະ ບໍ່ສາມາດໃຊ້ໃນກໍລະນີການສຶກສາ ACOFP. ໃນທາງກົງກັນຂ້າມ, ການສຶກສາ ACOFP ກໍສາມາດພົບເຫັນ ແລະ ຊົມໃຊ້ໃນການຄົ້ນຄວ້າຜ່ານມາເຊັ່ນ: ການຄວບຄຸມການເຮັດວຽກໃນພາວະດິສຸດຂອງ MG (Levron et al., 2013). ແຕ່ສຳລັບຄົນລາວ, ການສຶກສາດັ່ງກ່າວນັ້ນເປັນພາສາຕ່າງປະເທດ ແລະ ຍັງຮຽກຮ້ອງຄວາມຮູ້ຂັ້ນສູງເພື່ອເຂົ້າໃຈ ແລະ ສາມາດນຳໄປປະຍຸກໃຊ້ໃນຂັ້ນຕໍ່ໄປ. ເວົ້າສະເພາະເອກະສານທີ່ເປັນພາສາລາວທີ່ສາມາດຊ່ວຍ ພ້ອມດ້ວຍສິ່ງເສີມທັກສະໃຫ້ຜູ້ອ່ານສາມາດເຂົ້າເຖິງການສຶກສາ ACOFP ແມ່ນຍັງບໍ່ມີ.

ໃນ ສປປ ລາວ, ເຮົາສາມາດພົບເຫັນການຄົ້ນຄວ້າທີ່ເປັນພາສາລາວໃນຂະແໜງດັ່ງກ່າວເຊັ່ນ: ການສຶກສາຄວາມສະຖຽນລະພາບຂອງລະບົບ (Bounlavong & Phrakonkham, 2017) ແລະ ວາງແຜນການຕິດຕັ້ງບໍ່ກຳເນີດໄຟຟ້າ ໂດຍໃຊ້ ເຕັກນິກ ACPF ເຂົ້າໃນການວິເຄາະສະເພາະຈຸດເຊັ່ນ: ຄຳນວນຫາການໄຫຼຂອງກຳລັງໄຟຟ້າ ໂດຍບໍ່ພິຈາລະນາເຖິງການໄຫຼພາວະດິສຸດ. ຜົນການສຶກສາຈະຊີ້ໃຫ້ເຫັນເຖິງຂະໜາດຂອງກຳລັງຈິງ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກ ທີ່ຈຳເປັນຈະຕ້ອງມີ ເພື່ອຮັກສາສະຖຽນລະພາບຂອງລະບົບໃນພາວະນັ້ນໆ, ຢ່າງໃດກໍຕາມ ການສຶກສາຍັງບໍ່ໄດ້ສອງແສງເຖິງວ່າກຳລັງຈິງ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກມີຄ່າທີ່ເໝາະສົມ ຫຼື ດີທີ່ສຸດຫຼືບໍ່ເພາະວ່າອາດຈະມີຄ່າອື່ນທີ່ເໝາະສົມກວ່າ ທີ່ຈະຮັກສາສະຖຽນລະພາບຂອງລະບົບໄດ້ຄືກັນ. ຜົນຂອງການນຳໃຊ້ເຕັກນິກ ACOFP ນອກຈາກຈະຊີ້ໃຫ້ເຫັນວ່າ ມີການໄຫຼຂອງກຳລັງຈິງ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກຂະໜາດທີ່ດີທີ່ສຸດ ຫຼື ເໝາະສົມທີ່ສຸດທີ່ຈະເຮັດໃຫ້ລະບົບມີສະຖຽນລະພາບຄືເກົ່າ ແຕ່ຍັງໄດ້ໃຫ້ຄຳການສູນເສຍຂອງ ກຳລັງຈິງ ແລະ ກຳລັງສຳນຶກ ຊຶ່ງມີຜົນຄຸນນະພາບຂອງລະບົບໄຟຟ້ານຳອີກ.

ສະນັ້ນ, ອີງຕາມວິທີການຕັ້ງໂຈດ ACOFP ທີ່ໄດ້ນຳສະເໜີໃນບົດຄວາມສະບັບນີ້, ໂຈດບັນຫາສຳລັບການສຶກສາ ACOFP ເພື່ອຫຼຸດຜ່ອນການສູນເສຍໄດ້ຖືກແຕ່ງຂຶ້ນໂດຍໃຊ້

ພາສາລາວເປັນຫຼັກ. ໂດຍມີຈຸດປະສົງເພື່ອເປັນຕົວຢ່າງ ແລະ ສະໜອງໃຫ້ຜູ້ອ່ານເຂົ້າເຖິງຖ່ອງແທ້ຂອງການສຶກສາ ACOFP. ເຊິ່ງບົດໂຈດທີ່ຕັ້ງຂຶ້ນມີຜື່ນຖານຈາກການສຶກສາການໄຫຼທີ່ກ່າວໃນ (Glover et al., 2023; Saadat, 1999) ແຕ່ໄດ້ເພີ່ມຫຼັກການການສຶກສາ ACOFP ເຂົ້າໄປ. ໃນຄະນະທີ່ຜົນໄດ້ຮັບໄດ້ມີການປຽບທຽບກັບໂປຼແກຼມສຳເລັກຮູບ “DIGSILENT” ທີ່ປະຈຸບັນນຳໃຊ້ໂດຍບໍລິສັດ EDL ເພື່ອຍັງຍືນຜົນອອກ. ນອກຍັງສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງຜົນການສ້າງໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOFP ໂດຍອີງຈາກວິທີການຕັ້ງໂຈດທີ່ສະເໜີບົດຄວາມສະບັບນີ້, ທີ່ສາມາດນຳໄປເຖິງຜົນອອກທີ່ຖືກຕ້ອງ. ໃນກໍລະນີນີ້, ຜົນໄດ້ຮັບສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງຄວາມໃກ້ຄຽງລະວ່າງຜົນຂອງໂຈດທີ່ສ້າງຂຶ້ນ ແລະ ຈາກໂປຼແກຼມ DIGSILENT. ເຊິ່ງຜົນຮັບດັ່ງກ່າວໄດ້ສ້າງຄວາມໜ້າເຊື່ອຖືໃຫ້ຜູ້ອ່ານ ແລະ ຜູ້ທີ່ຈະຊົມໃຊ້ວິທີການຕັ້ງໂຈດ ACOFP ທີ່ສະເໜີໃນບົດຄວາມນີ້ໃນຂັ້ນຕໍ່ໄປ.

5. ສະຫຼຸບ

ໃນວຽກງານນີ້, ບົດຄຸມສຳລັບການຕັ້ງໂຈດບັນຫາທາງຄະນິດສາດເພື່ອການສຶກສາ ACOFP ໄດ້ຖືກນຳສະເໜີ. ບົດຄວາມສະບັບນີ້ມີຈຸດປະສົງເພື່ອຊ່ວຍໃຫ້ຜູ້ອ່ານເຂົ້າໃຈແນວຄວາມຄິດຂອງການເຮັດວຽກພາວະດິສຸດຂອງລະບົບໄຟຟ້າກຳລັງ, ໃນຂະນະທີ່ຜູ້ອ່ານສາມາດໃຊ້ເປັນສື່ອ້າງອີງສ້າງໂຈດບັນຫາການສຶກສາ ACOFP ເປັນຂອງຕົນເອງ. ກອນອື່ນໝົດ, ແນວຄວາມຄິດທີ່ໄປສຳລັບການສຶກສາ ACOFP ໄດ້ຖືກນຳສະເໜີ. ຕໍ່ດ້ວຍ, ສະເໜີວິທີການສ້າງໂຈດບັນຫາ ACOFP. ຫຼັງຈາກນັ້ນ, ໂຈດສົມຜົນການສຶກສາ ACOFP ໄດ້ຖືກສ້າງຂຶ້ນໂດຍອີງໃສ່ວິທີການສ້າງໂຈດທີ່ສະເໜີໃນບົດຄວາມນີ້. ເພື່ອຍົກຕົວຢ່າງການນຳໃຊ້ວິທີການ, ການສຶກສາການ ACOFP ສຳລັບການຫຼຸດຜ່ອນກຳລັງງານສູນເສຍໃນລະບົບສາຍສົ່ງ AC ໄດ້ຖືກນຳໃຊ້. ສຸດທ້າຍ, ສາມກໍລະນີສຶກສາໄດ້ກຳນົດຂຶ້ນເພື່ອຈຳລອງເຫດການ ໂດຍອີງຕາມສາຖານະການເຊື່ອມຕໍ່ຂອງເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກ, ແລະ ຕາມຄາດໝາຍ ຜົນໄດ້ຮັບສະແດງໃຫ້ເຫັນເຖິງການປັບປຸງການເຮັດວຽກຂອງລະບົບ ໂດຍເຫັນໄດ້ຈາກສູນເສຍກຳລັງໃນລະບົບສາຍສົ່ງລຸດລົງໃນກໍລະນີທີ່ເຂື່ອນໄຟຟ້ານ້ຳຕົກເຮັດວຽກ.

6. ຂໍ້ຂັດແຍ່ງ

ພວກຂ້າພະເຈົ້າໃນນາມນັກຄົ້ນຄວ້າວິທະຍາສາດ ຂໍປະຕິຍານຕົນວ່າ ຂໍ້ມູນທັງໝົດທີ່ມີໃນບົດຄວາມວິຊາການດັ່ງກ່າວນີ້ ແມ່ນບໍ່ມີຂໍ້ຂັດແຍ່ງທາງຜົນປະໂຫຍດກັບພາກສ່ວນໃດ ແລະ ບໍ່ໄດ້ເອື້ອປະໂຫຍດໃຫ້ກັບພາກສ່ວນໃດ

ພາກສ່ວນໜຶ່ງ, ກໍລະນີມີການລະເມີດ ໃນຮູບການໃດໜຶ່ງ ຂ້າພະເຈົ້າມີຄວາມຍິນດີ ທີ່ຈະຮັບຜິດຊອບແຕ່ພຽງຜູ້ດຽວ.

7. ເອກະສານອ້າງອີງ

- Abdi, H., Beigvand, S. D., & Scala, M. La. (2017). A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(December 2016), 742–766. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.102>
- Acha, E., Agelidis, V. G., Anaya-Lara, O., & Miller, T. J. E. (2002). *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Newnes. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- 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>
- 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.
- Factory, P. (2023). *PowerFactory 2023 User Manual* (2023rd ed.). DlgSILENT GmbH.
- Fang, S., & Wang, H. (2021). *Optimization-Based Energy Management for Multi-energy Maritime Grids*. Springer. <http://www.springer.com/series/10523>
- Glover, J. D., S. Sarma, M., J. Overbye, T., & B. Birchfield, A. (2023). *Power System Analysis and Design*. Cengage.
- Kamarposhti, M. A., Shokouhandeh, H., Colak, I., Band, S. S., & Eguchi, K. (2021). Optimal Location of FACTS Devices in Order to Simultaneously Improving Transmission Losses and Stability Margin Using Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Access*, 9, 125920–125929. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108687>
- 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>
- Levron, Y., Guerrero, J. M., & Beck, Y. (2013). Optimal power flow in microgrids with energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3226–3234. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2245925>
- Macedo, L. H., Member, S., Franco, J. F., & Rider, M. J. (2015). Optimal Operation of Distribution Networks Considering Energy Storage Devices. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, 6(6), 1–12.
- 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.”*
- 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.
- Vaccaro, A., & Cañizares, C. A. (2018). A knowledge-based framework for power flow and optimal power flow analyses. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 230–239. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2549560>
- Vergara, P. P., Lopez, J. C., Rider, M. J., & Da Silva, L. C. P. (2019). Optimal Operation of Unbalanced Three-Phase Islanded Droop-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 928–940. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2756021>
- 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>