

Compensation de la perte d'inertie d'un réseau électrique par des dispositifs de réponse rapide

Sacha PERRIN, MP1-MPi, 2026-2027

12 janvier 2026

Professeur encadrant : Frédéric Serier, Rémi Hutin, Antoine Chauchat

Motivations pour le choix du sujet (50 mots)

La transition vers les énergies renouvelables réduit l'inertie mécanique des réseaux, menaçant leur stabilité fréquentielle. Ce sujet m'intéresse car il permet de modéliser ce phénomène critique et d'évaluer par simulation si des solutions innovantes, comme l'inertie synthétique, peuvent compenser cette vulnérabilité structurelle.

Ancrage du sujet au thème de l'année (50 mots)

Le réseau électrique repose sur le cycle fondamental de la tension alternative (50Hz). Sa stabilité est maintenue par des boucles d'asservissement. Ce TIPE étudie comment l'ajout d'une boucle de contrôle rapide (inertie synthétique) permet de réguler ce cycle face aux perturbations, malgré la diminution de l'énergie naturelle.

Positionnement thématique

INFORMATIQUE - Informatique pratique , PHYSIQUE - Mécanique

Mots-clefs

Mots-clefs – Stabilité fréquentielle – Simulation numérique – Inertie – RoCoF – Inertie synthétique

Keywords – Frequency stability – Numerical simulation – Inertia – RoCoF – Synthetic inertia

présenter l'équation de swing
qui a l'air d'être ton équation

Bibliographie commentée (650 mots maximum)

La stabilité des réseaux électriques synchrones repose historiquement sur l'inertie mécanique fournie par les masses tournantes des générateurs conventionnels. Cette énergie cinétique stockée amortit naturellement les variations brusques de charge, limitant la vitesse de dérive de la fréquence. Cependant, la transition énergétique massive vers des sources renouvelables, connectées par électronique de puissance, entraîne une diminution drastique de cette inertie globale.

Cette mutation structurelle rend le réseau plus vulnérable. Comme le soulignent Ulbig et al. [1], la dynamique fréquentielle est alors régie par une modification des paramètres de l'équation de swing : une inertie plus faible se traduit par une augmentation du RoCoF et une excursion plus profonde du nadir de fréquence. Les opérateurs, tels que l'ENTSO-E [2], définissent désormais des seuils critiques de RoCoF au-delà desquels les protections risquent de déclencher des délestages en cascade.

Face à ce risque, la littérature explore des solutions de compensation active via des dispositifs de réponse rapide (*Fast Frequency Response*). Alsharif et al. [3] dressent un panorama de ces technologies (batteries, supercondensateurs) capables d'injecter de la puissance en quelques centaines de millisecondes. L'enjeu est de synthétiser un comportement mimant celui d'une machine synchrone. C'est le principe de l'inertie virtuelle, dont Jafari et al. [4] détaillent les stratégies de contrôle : en asservissant la puissance à la dérivée de la fréquence (df/dt), les convertisseurs peuvent artificiellement freiner la chute de fréquence.

Toutefois, l'inertie synthétique est une réponse calculée, soumise à des délais de mesure. Khan et al. [5] précisent que la stabilité dépend de l'architecture de contrôle, distinguant les onduleurs *grid-following* des *grid-forming*, ces derniers offrant une robustesse accrue. Enfin, des études prospectives à long terme [6] montrent que le dimensionnement doit être rigoureux pour éviter d'introduire de nouvelles instabilités. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude, visant à modéliser l'efficacité réelle de ces boucles de rétroaction.

définir ces
termes
techniques

Problématique retenue (50 mots)

Face à la diminution critique de l'inertie mécanique des réseaux, il m'a semblé pertinent d'étudier dans quelle mesure une commande d'inertie synthétique peut s'y substituer. Via la simulation numérique de l'équation de swing, je chercherai à déterminer si ce contrôle rapide suffit à limiter le RoCoF et garantir la stabilité fréquentielle.

Objectifs du TIPE (100 mots maximum)

1. Modélisation : J'établirai le modèle d'un réseau agrégé via l'équation de swing pour démontrer théoriquement comment la réduction de l'inertie mécanique (énergie cinétique) dégrade la stabilité fréquentielle et augmente le RoCoF.
2. Simulation numérique : La résolution numérique du système permettra d'implémenter une loi de commande d'inertie synthétique (asservissement à la dérivée de la fréquence) et d'étudier sa réponse dynamique face à une perturbation.
3. Observations : En comparant les nadirs et temps de stabilisation, je déterminerai l'efficacité de ce contrôle et ses limites de stabilité face aux contraintes physiques (délais, saturation en puissance).

Références

- [1] Andreas ULBIG, Theodor S BORSCHÉ et Göran ANDERSSON : Impact of low rotational inertia on power system stability and operation. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):7290–7297, 2014. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02615>.
- [2] ENTSO-E : Inertia and rate of change of frequency (rocof). Rapport technique v17, ENTSO-E, Décembre 2020. 16 Dec 2020.
- [3] H ALSHARIF, M JALILI et K N HASAN : Fast frequency response services in low inertia power systems - a review. *Energy Reports*, 9:Suppl., 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.193>.
- [4] M JAFARI, G B GHAREHPETIAN et A ANVARI-MOGHADDAM : On the role of virtual inertia units in modern power systems : A review of control strategies, applications and recent developments. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 159:110067, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110067>.

- [5] M KHAN, W WU et L LI : Grid-forming control for inverter-based resources in power systems : A review on its operation, system stability, and prospective. *IET Renewable Power Generation*, 2024. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12991>.
- [6] ENTSO-E : Updated frequency stability analysis in long term scenarios, relevant solutions and mitigation measures. Rapport technique (project inertia phase ii), ENTSO-E, Novembre 2023. 8 Nov 2023.