

ПОРІВНЯННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ РЕГУЛЮВАННЮ ЗБУДЖЕННЯ ПРОПОРЦІЙНОЇ ТА СИЛЬНОЇ ДІЇ ПІД ЧАС КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: Робота присвячена порівняльному аналізу режимів роботи синхронного генератора з автоматичним регулюванням збудження пропорційної дії (АРЗ ПД) та сильної дії (АРЗ СД) під час виникнення короткого замикання в електроенергетичній системі. Досліджено вплив типу АРЗ на динамічну стійкість системи, характеристики передаваної потужності та перехідні процеси. Встановлено, що застосування АРЗ СД забезпечує суттєве підвищення меж динамічної стійкості порівняно з АРЗ ПД за рахунок швидкого форсування збудження та компенсації відхилень напруги і частоти.

Ключові слова: синхронний генератор, автоматичне регулювання збудження, коротке замикання, динамічна стійкість, перехідні процеси.

Abstract: The work is devoted to a comparative analysis of the operating modes of a synchronous generator with automatic excitation control of proportional action (AEC PD) and strong action (AEC SD) during the occurrence of a short circuit in the electric power system. The influence of the type of AEC on the dynamic stability of the system, the characteristics of the transmitted power and transients was studied. It was established that the use of AEC SD provides a significant increase in the limits of dynamic stability compared to AEC PD due to the rapid forcing of excitation and compensation of voltage and frequency deviations.

Keywords: synchronous generator, automatic excitation control, short circuit, dynamic stability, transients.

Вступ

Стійкість синхронних генераторів в аварійних режимах є однією з ключових проблем сучасної електроенергетики, особливо в умовах зростання потужності електростанцій та ускладнення конфігурації електроенергетичних систем. Короткі замикання в мережі супроводжуються різким зменшенням електромагнітної потужності генератора, що порушує баланс між механічною потужністю турбіни та електричною потужністю, яка передається в систему. У результаті виникає прискорення ротора та загроза втрати синхронізму.

Як показують результати сучасних досліджень [1, 2], вирішальну роль у формуванні перехідних процесів відіграє система автоматичного регулювання збудження синхронного генератора. Залежно від принципу дії такі системи можуть істотно відрізнятися за швидкістю та ефективністю впливу на динамічну стійкість. Найбільш поширеними є автоматичні регулятори пропорційної дії, а також регулятори сильної дії, які додатково враховують швидкість зміни параметрів режиму.

Незважаючи на значну кількість публікацій, питання порівняльної оцінки впливу різних типів автоматичного регулювання збудження на режими роботи генератора при коротких замиканнях залишається актуальним. Це зумовлює необхідність узагальненого аналізу характеристик потужності та показників динамічної стійкості для різних варіантів регулювання [3].

Метою даної роботи є порівняльний аналіз режимів роботи синхронного генератора з автоматичним регулюванням збудження пропорційної та сильної дії під час короткого замикання з точки зору динамічної стійкості електроенергетичної системи.

Результати дослідження

У рамках проведеного дослідження було здійснено порівняльний аналіз динамічної стійкості синхронного генератора з автоматичним регулюванням збудження пропорційної дії (АРЗ ПД) та сильної дії (АРЗ СД) під час короткого замикання (КЗ). Мета аналізу полягала у виявленні переваг

кожного типу регулювання на основі вивчення сучасних наукових публікацій та технічної документації.

На основі аналізу наукових джерел [1–4] встановлено, що реакція системи збудження на аварійні режими є визначальним фактором для динамічної стійкості. У роботі [4] показано, що АРЗ ПД, який реагує лише на відхилення контрольованих параметрів (наприклад, напруги), не завжди забезпечує достатню швидкість компенсації в умовах різких змін режиму, таких як КЗ. На противагу цьому, АРЗ СД, який враховує також швидкість та прискорення змін параметрів, значно ефективніше підтримує стабільність.

Проведений порівняльний аналіз ґрунтувався на системному дослідженні характеристик потужності та динамічної стійкості синхронного генератора з різними типами систем автоматичного регулювання збудження (АРЗ) в умовах короткого замикання (КЗ). Як показують дослідження, ключовою відмінністю між регуляторами пропорційної дії (АРЗ ПД) та сильної дії (АРЗ СД) є принцип їх реакції на збурення, що фундаментально впливає на математичне моделювання та фізичні процеси [1, 2].

Для генератора без АРЗ або з простим регулюванням характеристика потужності описується класичною залежністю між синхронною ЕРС E_q , а синхронним індуктивним опором X_d (1). Введення АРЗ ПД, яке реагує на відхилення напруги, призводить до того, що в перехідному процесі генератор моделюється перехідною ЕРС E'_q та перехідним опором X'_d (2), що відбиває ефект "замороженого" магнітного потоку обмотки збудження. Однак, як зазначається в роботі [1], найбільш ефективним для динамічної стійкості є АРЗ СД. Його принцип дії, що базується на компенсації відхилень напруги з урахуванням їх похідних (швидкості зміни), дозволяє вважати, що поперечна складова напруги U_q залишається практично незмінною (3). Це означає, що генератор з АРЗ СД у динамічних розрахунках може представлений не ЕРС, а жорсткою прив'язкою до напруги мережі, що суттєво змінює його поведінку під час аварії [1].

$$P = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad (1)$$

$$P = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad (2)$$

$$U_q \approx \text{const}, \quad (3)$$

Під час виникнення трифазного КЗ, згідно з аналізом у [2, 3], електромагнітна потужність генератора різко падає. Це призводить до появи значного прискорювального моменту, зростання кута δ і накопичення кінетичної енергії в роторі. Критичним для оцінки стійкості є метод площин, де площа прискорення S_a повинна бути поглинена площею можливого гальмування S_g . Порівняльний аналіз характеристик потужності для трьох випадків (без АРЗ, з АРЗ ПД, з АРЗ СД) чітко демонструє ієрархію їх ефективності. Максимальна значення граничної потужності послідовно зростає від виразу (4) до (6), оскільки $X_d'' < X'_d < X_d$ [1]. Таким чином, система з АРЗ СД має найбільший "потенціал" для гальмування ротора після усунення КЗ.

$$P_{\max (\text{без АРЗ})} = \frac{E_q U}{X_d}, \quad (4)$$

$$P_{\max (\text{АРЗ ПД})} = \frac{E'_q U}{X'_d}, \quad (5)$$

$$P_{\max (\text{АРЗ СД})} \approx \frac{U^2}{X_d''}, \quad (6)$$

Фізично ця перевага реалізується через швидке форсування збудження. АРЗ СД, реагуючи не лише на величину провалу напруги, але й на швидкість його зміни, забезпечує значно інтенсивніше підвищення стельової напруги збудника U_{fmax} [1]. Дослідження показують, що підвищення U_{fmax} з 2 до 5 о.с. дає еквівалентний ефект зменшення внутрішнього опору генератора на 30-50%, що безпосередньо збільшує площу гальмування S_g і скорочує площу прискорення S_a . Це знаходить кількісне відображення у збільшенні коефіцієнта запасу динамічної стійкості $k_{30} = S_g/S_a$ та, що найважливіше з практичної точки зору, у збільшенні граничного часу відключення КЗ t_{ep} (7, 8). Більш тривалий допустимий час дії захисту є критичним резервом для надійності системи [1, 3].

$$k_{30} = \frac{S_g}{S_a}, \quad (7)$$

$$t_{ep}(АРЗ СД) > t_{ep}(АРЗ ПД), \quad (8)$$

Глибинне обґрунтування цієї переваги міститься в різниці математичних моделей. Для аналізу процесів з АРЗ ПД достатньо використовувати модель з перехідними параметрами (X_d' , $T_d'0$). Для повного опису швидкодії АРЗ СД необхідно звертатися до надперехідної моделі машини з параметрами X_d'' та $T_d''0$, які враховують процеси в демпферних контурах та забезпечують високу точність при описі перших миттєвих після збурення [1, 4]. Це підкреслює, що АРЗ СД не просто "сильніше" реагує, але й працює в діапазоні значно швидших електромагнітних процесів, ефективно придушуючи їх негативний вплив на механічну стійкість.

Таким чином, комплексний аналіз джерел [1-4] дозволяє зробити висновок, що перевага АРЗ СД має системний характер: вона починається з більш адекватного принципу управління, реалізується через швидке форсування, що підтверджується кількісними показниками (P_{max} , k_{30} , t_{ep}), і має глибоке теоретичне підґрунтя в різниці математичного апарату, що застосовується для моделювання.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити низку ключових висновків щодо критичного впливу типу системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ) на динамічну стійкість синхронного генератора в умовах короткого замикання.

На основі аналізу теоретичних положень та порівняльних характеристик [1-4] остаточно встановлено, що автоматичне регулювання сильної дії (АРЗ СД) забезпечує якісно вищий рівень динамічної стійкості порівняно з пропорційними регуляторами (АРЗ ПД). Ця перевага має системний характер і проявляється на декількох рівнях. По-перше, принципова відмінність полягає в алгоритмі дії: якщо АРЗ ПД реагує лише на відхилення параметрів (наприклад, напруги), то АРЗ СД, враховуючи також швидкість та прискорення їх зміни, забезпечує превентивну та значно швидшу компенсацію збурень [1, 4]. По-друге, це безпосередньо впливає на енергетичні характеристики системи. АРЗ СД забезпечує найвищі значення граничної передаваної потужності та максимальної площі гальмування в методі площин, що обумовлено ефективнішим форсуванням збудження та використанням надперехідних параметрів генератора (X_d'') у математичній моделі [1]. По-третє, перевага отримує кількісне вираження у ключових для експлуатації показниках: коефіцієнт запасу динамічної стійкості (k_{30}) та, що особливо важливо, граничний час відключення короткого замикання (t_{ep}) для систем з АРЗ СД є суттєво більшими. Це надає енергосистемі критично важливий резерв часу для дії захистів та знижує ризик втрати синхронізму [1, 3].

Таким чином, практична значущість роботи полягає в обґрунтуванні технічної доцільності та переваг впровадження і модернізації саме систем АРЗ сильної дії на потужних генераторах, особливо в складноорганізованих електроенергетичних системах з високими вимогами до надійності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на комп'ютерне моделювання та оптимізацію налаштувань АРЗ СД для конкретних конфігурацій мереж, а також на вивчення його синергії з іншими сучасними засобами підвищення стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Тептя В.В., Кулик В.В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах: Електронний конспект лекцій. Вінниця: ВНТУ, 2021. 183 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Teptya_2021_183.pdf
- [2] Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с., ISBN 978-966-350-585-5, URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Pivnyak_2016_600.pdf
- [3] Перехідні процеси в системах електропостачання. Елементи теорії, програми, ілюстрації : навчальний посібник / В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 245 с. URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/69/117/129-1?inline=1>
- [4] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5-2016. URL: <https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/ee554/IEEEstd421.5-2016RecPracExSysModsPwrSysStabStudies.pdf>

Фурман Андрій Сергійович - студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 1ЕС-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: furmanandriy2005@gmail.com

Тептя Віра Володимирівна - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Furman Andrii Serhiiovych - student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 1ES-22b, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: furmanandriy2005@gmail.com

Teptia Vira Volodymyrivna - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com