

УДК 621.313

**МЕТОД ФОРСУВАННЯ ПЕРВИННОГО ДВИГУНА ДИЗЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА
МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЙОГО СИНХРОННОЇ РОБОТИ
ІЗ МЕРЕЖЕВОЮ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ**

І.М. Луценко¹, Н.Ю. Рухлова¹, Є.В. Кошеленко¹, П.С. Циган¹, О.А. Замкова¹

¹ Україна, м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка»

**METHOD OF FORCING THE PRIMARY ENGINE OF THE DIESEL GENERATOR
LOW POWER TO MAINTAIN ITS SYNCHRONOUS WORK
WITH NETWORK PHOTOELECTRIC STATION**

I.M. Lutsenko¹, N.YU. Rukhlova¹, Ye.V. Koshelenko¹, P.S. Tsigan¹, A.A. Zamkova¹

¹ Ukraine, Dnipro, Dnipro university of technology

Мета. Дослідження процесів регулювання генерації відновлюваних джерел енергії в умовах розподільчих електричних мереж 0,4 кВ промислових підприємств або окремих населених пунктів при наявності дизельного генератора малої потужності з метою збереження режиму паралельної роботи дизельного генератора та фотоелектричної станції з мережевими інверторами. Установлення вимог та обмежень по ефективному впровадженню розподіленої генерації для невеликих промислових підприємств та побутових споживачів електричної енергії, енергокооперативів в режимах аварійного резервування живлення місцевих електричних навантажень.

Методика дослідження. Аналіз особливостей забезпечення роботи відновлюваних джерел енергії паралельно з дизельним генератором без порушення режиму передачі електричної енергії до відключеної мережі зі збереженням стійкості роботи інвертора фотоелектричної станції паралельно з дизельним генератором. Аналіз впливу інвертора струму фотоелектричної станції на дизельний генератор в режимі близькому до холостого ходу, а також на режим роботи інвертора струму фотоелектричної станції при зміні частоти дизельного генератора в процесі накидання навантаження та відповідне регулювання частоти і потужності. Обґрунтування шляхів вирішення питання технічного забезпечення переходу на резервне живлення за рахунок засобів автоматизації зі спеціальним алгоритмом послідовності пуску системи резервного живлення.

Результати дослідження. Запропоновано метод комбінованої роботи децентралізованих джерел енергії в розподільчих електричних мережах. Проаналізовано фактори впливу на режими паралельної роботи системи з двох джерел електричної енергії. Система за умови відсутності регулятора не забезпечує статичну стійкість та потребує автоматизації процесів скидання/накидання навантаження в умовах автоматизованого пуску і зупинки дизельного агрегату.

Наукова новизна полягає у розробці методології забезпечення режимів паралельної роботи двох децентралізованих джерел енергії з різними властивостями та можливості балансування потужності за рахунок форсування двигуна генератора за параметром частоти.

Практичне значення. Полягає у можливості ефективного впровадження розподіленої генерації для невеликих промислових підприємств та побутових споживачів електричної енергії, енергокооперативів у режимах аварійного резервування живлення місцевих електричних навантажень.

Ключові слова: децентралізовані джерела енергії, мережева фотоелектрична станція, дизельний генератор, система резервного живлення

Вступ

Одним з заходів, що сприяють зниженню витрати палива для дизельних електростанцій є застосування додаткових джерел живлення, ввімкнених паралельно. Одним з таких джерел живлення може бути розглянута фотоелектрична станція. Тенденції сьогодення свідчать про перспективи розвитку відновлюваних джерел енергії, тому в Україні протягом останніх трьох років спостерігається стрімке зростання обсягів спорудження об'єктів відновлюваної енергетики, зокрема збільшення кількості приватних мережевих фотоелектричних станцій. Закономірним є те, що більшість такого роду станцій не мають накопичувачів енергії оскільки стимуляція зростання обсягів відновлюваних джерел енергії в Україні переважно відбувається за рахунок наявності «зеленого тарифу», за яким, згідно Закону України «Про електроенергетику», вся електроенергія, вироблена з альтернативних джерел, гарантовано придбається протягом всього строку застосування "зеленого" тарифу. Таким чином накопичення електричної енергії в даному випадку не є економічно доцільним, а станції з накопичувачами енергії за не є рентабельними оскільки

суттєво збільшується їх термін окупності за рахунок додаткової вартості акумулюючих засобів та конструктивно складніших гібридних інверторів.

Постановка задач дослідження

Метою статті є дослідження процесів регулювання генерації ВДЕ в умовах розподільчих електричних мереж 0,4 кВ промислових підприємств або окремих населених пунктів при наявності дизельного генератора малої потужності з метою збереження режиму паралельної роботи дизельного генератора та фотоелектричної станції з мережевими інверторами. Процеси регулювання генерації ФЕС в мережах 0,4 кВ практично не застосовуються, тому, у разі аварійного відключення ділянки мережі, де знаходиться джерело ВДЕ з grid-tie-інверторами буде спостерігатися недовиробіток електричної енергії ФЕС, яку потенційно можна передати в мережу. При наявності на території об'єкта дизельної електростанції з'являється можливість забезпечити живлення місцевого електричного навантаження, при цьому значно скоротивши витрати палива за рахунок ВДЕ. Проте, виникає ряд технічних і юридичних питань щодо забезпечення роботи ВДЕ паралельно з дизельним генератором, не порушуючи режим передачі електричної енергії до відключеної мережі; забезпечення стійкості роботи інвертора фотоелектричної станції паралельно з дизельним генератором; впливу інвертора струму фотоелектричної станції на дизельний генератор в режимі близькому до холостого ходу; режим роботи інвертора струму фотоелектричної станції при зміні частоти дизельного генератора в процесі накидання навантаження та відповідне регулювання частоти і потужності, тощо.

Робота мережевої фотоелектричної станції обумовлена не тільки типом станції і обладнання, а й правовими аспектами: при підключенні генерації до розподільних мереж дане приєднання є нестандартним підключенням до мережі. У такому випадку з'являється зона балансової приналежності. Зони балансової належності обумовлені технічними умовами до підключення, які видає оператор систем розподілу. Питання технічного забезпечення переходу на резервне живлення можливо вирішити за рахунок автоматизації (АВР) зі спеціальним алгоритмом послідовності пуску системи резервного живлення. Стандартні підходи до забезпечення резерву в даному випадку не можуть бути застосовані з ряду причин. Всі види АВР можна умовно поділити на два типи: перший з них працює з гарячими джерелами живлення (де забезпечується наявність напруги на шинах); другий варіант передбачає автоматизування пуску генератора (з інтервалом часу розгортання синхронної машини до номінальних робочих параметрів напруги і частоти). І в першому і в другому випадку порушується нормальна робота струмоприймачів споживачів електричної енергії на час переходу до резервного джерела живлення. У такому випадку потрібні додаткові засоби автоматизації для подальшого відключення (скидання навантаження) і його наступного АПВ з підключення інвертора на шини дизельного генератора, щоб уникнути накиду струмів самозапуску і пускових струмів зарезервованих агрегатів.

Таким чином АВР в даній конфігурації є багатоступеневою автоматикою яка повинна забезпечити:

- пуск дизельного агрегату;
- почергове відновлення живлення електроприймачів (АПВ);
- підключення джерела ВДЕ, спираючись на два основних параметри (напруга і частота генератора).

Особливістю генераторів малої потужності є малий обертовий момент на валу первинного двигуна і мала інерція ротора, що є причиною різкого відхилення частоти обертання машини, а відповідно і частоти змінного струму зі зниженням напруги. Тобто будь-яке накидання навантаження буде супроводжуватися відхиленням частоти, що буде зумовлювати аперіодичні коливання потужності, які будуть викликати аперіодичні затухаючі коливання всіх електричних параметрів. Ці коливання будуть мати характер аперіодичних коливань другого порядку, що вимагатиме застосування системи компенсації накиду струму навантаження за рахунок впливу на первинну машину з метою збереження її статичної стійкості. Збереження статичної стійкості синхронної машини в даному випадку є необхідною умовою для паралельної роботи інвертора струму фотоелектричної станції. Оскільки всі ланки системи (генератор, навантаження, інвертор фотоелектричної станції) мають власну інерцію, в процесі роботи при збурюючих впливах (скиданні і накиданні) навантаження будуть виникати врівноважуючі коливання до відновлення усталеного режиму роботи обладнання. Власна тривалість і характер електромеханічних перехідних процесів визначатиме стабільність роботи додаткового джерела живлення.

Згідно з технічною документацією на дизельний генератор, прийнятий до розгляду, нормальним навантаженням генератора є 70% від його номінальної потужності протягом тривалого режиму роботи. Так як генератор є джерелом резервного живлення, тривалість його роботи обмежена 8-9 годинами що обумовлено умовами його нагрівання. Робота на холостому ході більше 15 хвилин заборонена, після завершення роботи є необхідність в його короткочасній роботі на холостому ході з метою власного охолодження, в іншому випадку є ймовірність після зупинки дизельного агрегату вийти в режим перегріву внаслідок відсутності примусового охолодження.

З описаних вище правил експлуатації дизельного генератора слід зазначити, що для успішної інтеграції дизельного генератора в систему АВР необхідно автоматизувати не тільки пуск але і зупинку генератора з дотриманням і контролем режиму охолодження. Так як в технічній документації передбачено почергове включення електричних навантажень з метою зниження ударного навантаження на генератор, виникає необхідність автоматизації процесу почергового АПВ із застосуванням комутаційних апаратів з розчеплювачами мінімальної напруги, замість яких доцільніше застосувати автоматичні вимикачі з мотор приводами, реле контролю напруги і програмоване логічне реле (контролер) з резервним живленням від АКБ.

Основна частина роботи

Основним питанням даної статті є дослідження та розробка заходів щодо забезпечення режиму скидання/накидання електричних навантажень при роботі дизельного генератора в електричній мережі паралельно з ФЕС.

У момент, коли виконується розгортання синхронної машини, частота обертів не досягає необхідних меж в початковий момент часу. Для того, щоб попередити несправність дизельного генератора, завод виробник рекомендує в момент пуску відключати електричні навантаження з шин генератора, уникаючи ударного накидання навантаження на вал генератора. Не дивлячись на те, що збільшення моменту на валу дизельного агрегату має пологу «вентиляторну характеристику», за рахунок швидкості процесу даний момент має ударний характер, що може завдати пошкоджень дизельному агрегату і викликати механічну несправність деталей генератора.

Наступним етапом є вихід генератора в робочий режим і накидання електричних навантажень. Залежно від характеру електричних навантажень формуються значення показників тривалості процесу і пускового струму. Для генераторів малої потужності цей режим супроводжується короткочасним зниженням напруги і частоти електричного струму. Для кожного окремо взятого генератора є необхідність перевірити агрегат на накидання/скидання навантаження і зняти характеристики перехідних процесів в лабораторних умовах з метою отримання сімейства характеристик перехідних процесів, які в подальшому дають можливість обґрунтувати закон управління для динамічного регулювання дизельного агрегату з метою зниження амплітуд коливання частоти і напруги. Це дозволить скоротити час протікання перехідного процесу і зберегти статичну стійкість генератора при його роботі. Збереження статичної стійкості генератора необхідне як для нормальної роботи самого генератора, так і для струмоприймачів. При підключенні інвертора фотоелектричної станції параметр частоти є критичним, оскільки від нього залежить стабільність роботи інвертора.

Форсування обертів двигуна дизельного генератора можливо виконати за допомогою сервопривода, який взаємодіє з регулятором обертів дизельного двигуна (рис. 1). Сервопривод дозволяє виконати поворот валу на заданий кут за рахунок зміни скважності імпульсів від системи керування, механічно впливаючи на регулятор швидкості дизельного двигуна з метою корекції швидкості його обертання та збільшення потужності.

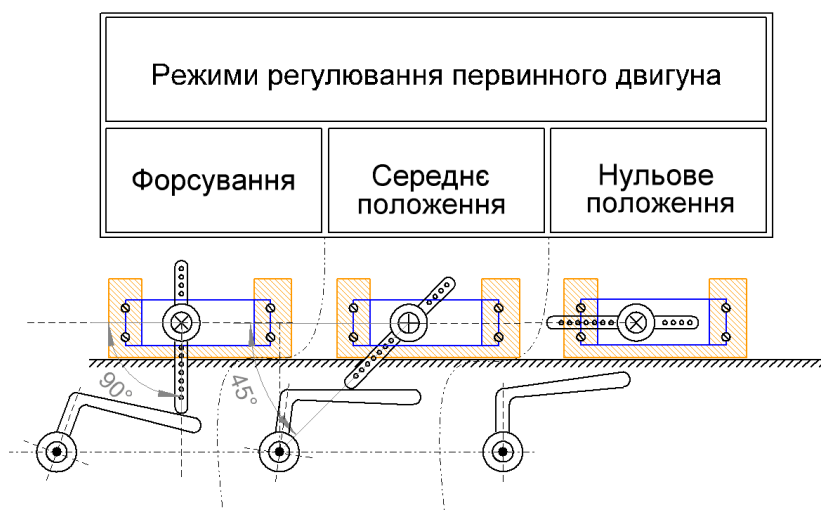


Рис.1 Режими положення сервоприводу в системі керування дизельним агрегатом генератора

Оскільки характер впливу на дизельний агрегат є не пропорційним, масштабування регулятора (з частотно-залежною характеристикою) $f(M)$ пропорційної дії виконується експериментально в залежності

від типу дизельного генератора. Основним параметром для системи регулювання дизельного агрегату є частота змінного струму. Частоту змінного необхідно контролювати у заданих межах, опорним значенням уставок є аварійне значення частоти змінного струму, при якому інвертор струму фотоелектричної станції виходить у режим захисту (48...52 Гц). Необхідно контролювати частоту змінного струму, для чого необхідно використати АЦП (блок ADC) у комбінації з датчиком струму. Це дозволить системі керування контролювати саме частоту струму навантаження приєднаного до генератора.

Завдання функції масштабування $f(\varphi)$ (рис. 2) перетворювати коливання частоти у допустимому діапазоні в кути нахилу валу сервоприводу, який механічно впливатиме на регулятор обертів двигуна (рис. 3).

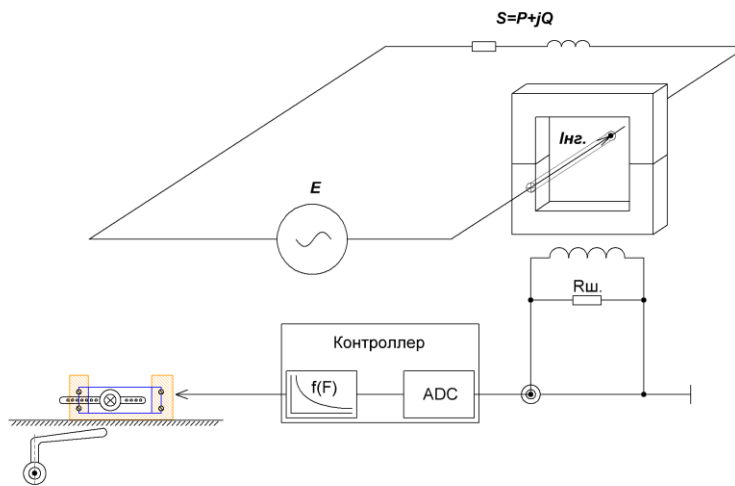


Рис. 2 Система керування з вимірювальним комплексом

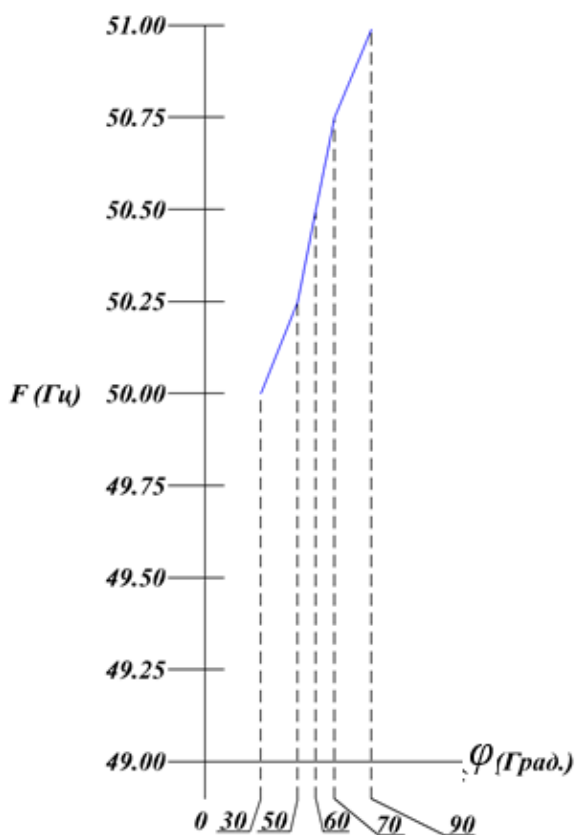


Рис. 3 Функція нелінійного масштабування частоти змінного струму у кут нахилу сервоприводу.
Висновки

Запропонований метод комбінованої роботи децентралізованих джерел енергії в розподільчих електричних мережах є перспективним до застосування в умовах ефективного впровадження розподільної генерації для невеликих промислових підприємств та побутових споживачів електричної енергії, енергокооперативів, тощо у режимах аварійного резервування живлення місцевих електричних навантажень. Особливо важливим є розвиток даного напрямку на шляху реалізації технологій «demand response» та smart-електропостачання. Методологічне забезпечення порядку вибору елементів системи керування та знаходження необхідного закону керування сервоприводом в конкретному випадку, створення універсальних моделей, накладення обмежень та рекомендацій є задачами для подальшого вирішення та розвитку даної роботи.

Список літератури

1. (2018). *Інструкція з експлуатації дизельного генератора KS5000*, 31с.
2. Горин, В.И. (1993). *Правила технической эксплуатации дизельных электростанций*. Режим доступа: <http://eom.com.ua/>. 51 с.
3. Боровиков, М.А. (1980). *Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики*. Издательство Саратовского университета. 392 с.
4. Бут, Д. А. (1994). *Синтез автономных электроэнергетических систем*. Изд-во Электричество. 17 с.
5. Папаїка, Ю.А. (2016). *Перехідні процеси в системах електропостачання*. Дніпро: НГУ. 600 с.

Рекомендовано до друку: к-том техню наук, доц. Ципленковим Д.В.

АННОТАЦІЯ

Цель. Исследование процессов регулирования генерации ВИЭ в условиях распределительных электрических сетей 0,4 кВ промышленных предприятий или отдельных населенных пунктов при наличии дизельного генератора малой мощности с целью сохранения режима параллельной работы дизельного генератора и фотоэлектрической станции с сетевыми инверторами.

Методика исследования. Анализ особенностей обеспечения работы возобновляемых источников энергии параллельно с дизельным генератором без нарушения режима передачи электрической энергии в отключенной сети с сохранением устойчивости работы инвертора фотоэлектрической станции параллельно с дизельным генератором. Анализ влияния инвертора тока фотоэлектрической станции на дизельный генератор в режиме близком к холостому ходу, а также на режим работы инвертора тока фотоэлектрической станции при изменении частоты дизельного генератора в процессе наброски нагрузки и соответствующее регулирование частоты и мощности. Обоснование путей решения вопроса технического обеспечения перехода на резервное питание за счет средств автоматизации со специальным алгоритмом последовательности пуска системы резервного питания.

Результаты исследования. Предложен метод комбинированной работы децентрализованных источников энергии в распределительных электрических сетях. Проанализированы факторы влияния на режимы параллельной работы системы из двух источников электрической энергии. Система при отсутствии регулятора не обеспечивает статическую устойчивость и требует автоматизации процессов сброса/наброски нагрузки в условиях автоматизированного пуска и остановки дизельного агрегата.

Научная новизна заключается в разработке методологии обеспечения режимов параллельной работы двух децентрализованных источников энергии с различными свойствами и возможности балансировки мощности за счет форсирования двигателя генератора по параметру частоты.

Практическое значение. Заключается в возможности эффективного внедрения распределенной генерации для небольших промышленных предприятий и бытовых потребителей электрической энергии, энергокооперативов в режимах аварійного резервирования питания местных электрических нагрузок.

Ключевые слова: децентрализованные источники энергии, сетевая фотоэлектрическая станция, дизельный генератор, система резервного питания

ABSTRACT

Objective. Investigation of the processes for regulating renewable energy generation in the conditions of 0.4 kV distribution electric networks of industrial enterprises or individual settlements with of a low-power diesel generator and its operation in combination with the photovoltaic station and grid-tie inverters. Establishment of requirements and restrictions for the effective implementation of distributed generation for small industrial enterprises and household consumers of electric energy, energy cooperative in emergency backup modes of power supply of local electrical loads.

Research methodology. Analysis of the features of ensuring the operation of renewable energy sources in parallel with a diesel generator without disrupting the transmission of power supply in a disconnected network while maintaining the stability of the photovoltaic station's inverter in parallel with a diesel generator. Analysis of the influence of the current inverter of a photovoltaic power plant on a diesel generator in a mode close to idling, as well as on the operating mode of a current inverter of a photovoltaic power station when the frequency of the diesel generator changes during a load surge and corresponding regulation of frequency and power. Justification of ways to solve the issue of technical support for the transition to backup power by use the automation with a special algorithm for starting the backup power system.

Findings. A method for the combined operation of decentralized energy sources in electrical distribution networks is proposed. The factors of influence on the modes of parallel operation of the system from two sources of electrical energy were analyzed. The system, in the absence of a regulator, does not provide static stability and requires automation of load shedding / loading processes under conditions of automated start and stop of a diesel unit.

The scientific originality lies in the development of a methodology for ensuring parallel operation modes of two decentralized energy sources with various properties and the possibility of balancing power due to forcing the generator engine in accordance with the frequency parameter.

The practical value lies in the possibility of the effective implementation of distributed generation for small industrial enterprises and household consumers of electric energy, energy cooperatives in emergency backup modes of power supply of local electrical loads.

Keywords: decentralized energy sources, grid-connected photovoltaic station, diesel generator, reserve power supply system.