

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА НАПРУГУ МЕРЕЖІ З ВДЕ ПРИ ЗБУРЕННЯХ

XXVII МНК «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» |
Київ, 20–22 травня 2026

В.С. Карнаух, А.А. Марченко
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Київ, 2026

- Зростаюча частка ВДЕ у розподільних мережах → стохастичні потоки потужності, двонаправлені перетоки, ускладнене керування напругою
- Критерій N-1: втрата одного елемента мережі може спричинити вихід напруги за допустимі межі ($\pm 10\%$)
- Традиційні методи компенсації (FACTS, конденсаторні батареї) — економічно неефективні для розподільного рівня
- **СНЕ з інверторним інтерфейсом мають невикористаний потенціал керування реактивною потужністю**

Мета: теоретичне обґрунтування та експериментальна верифікація підходу координованого керування активною та реактивною потужністю СНЕ для підтримки напруги при збуреннях N-1

- Аналіз чутливості напруги вузла до змін P та Q СНЕ (коефіцієнти $\partial U/\partial P$, $\partial U/\partial Q$)
- Моделювання N-1 сценарію у модифікованій мережі IEEE 14-bus (35 кВ)
- Дослідження трьох режимів роботи мережі: без СНЕ / P-only / P+Q Optimized
- Підтвердження ефективності запропонованого підходу

$$\Delta U_i = \frac{\partial U_i}{\partial P_{\text{СНЕ}}} \cdot \Delta P_{\text{СНЕ}} + \frac{\partial U_i}{\partial Q_{\text{СНЕ}}} \cdot \Delta Q_{\text{СНЕ}}$$

$$\sqrt{P_{\text{СНЕ}}^2 + Q_{\text{СНЕ}}^2} \leq S_{\text{НОМ}}$$

Рівн. (1) — вузлова чутливість

Рівн. (2) — обмеження інвертора

- У розподільних мережах R/X значне → напруга чутлива до обох складових
- P-only режим не компенсує втрати напруги на індуктивному опорі ліній
- **Задача: перерозподіл $S_{\text{НОМ}}$ між P та Q при збуренні N-1**

- Платформа: DigSILENT PowerFactory 2026 — RMS Simulation (динамічні перехідні процеси)
- Тестова мережа: модифікована IEEE 14-bus, адаптована до 35 кВ
- Вузол 10 — СНЕ (BESS): $S_{\text{ном}} = 6.7 \text{ MVA}$
- Вузол 13 — СЕС: 36 МВА
- Досліджуване збурення N-1: відключення ЛЕП між вузлами 06–11

Сценарій 1

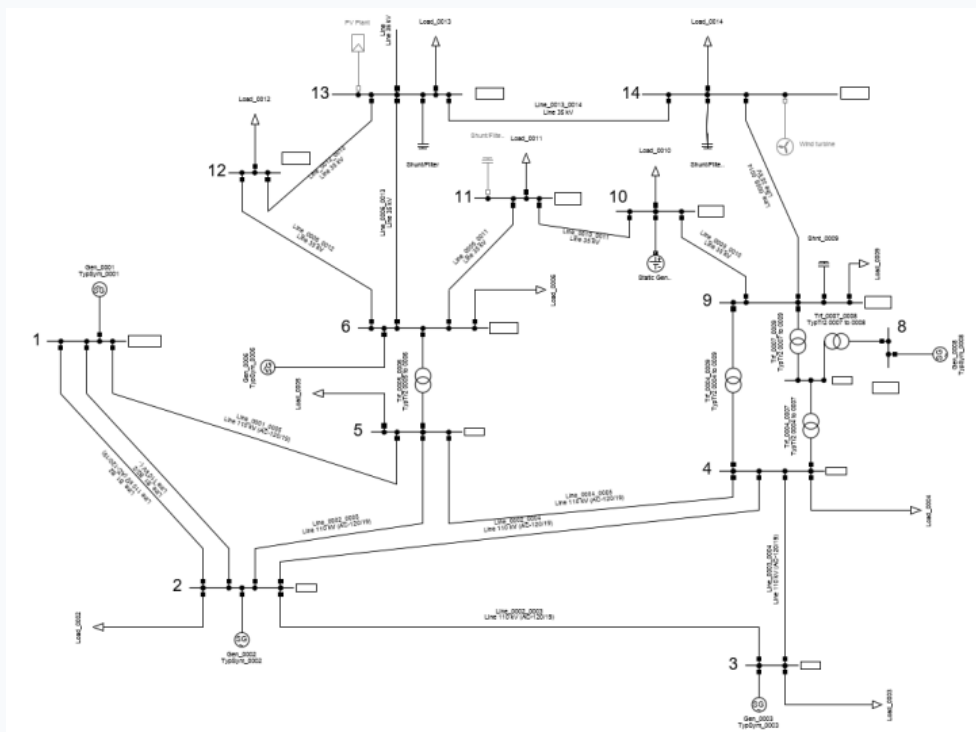
Без СНЕ
(базовий)

Сценарій 2

P-only
 $P=6.7 \text{ MW}$,
 $Q=0$

Сценарій 3

P+Q
Optimized
V-mode
control



Сценарій	Вузол 10, в.о.	Вузол 11, в.о.	Відповідність норм. ($\pm 10\%$)
1 — Без CHE	0.87	0.84	✗ Порушення
2 — P-only (6.7 МВт)	~0.91	0.88	✗ Порушення
3 — P+Q (6МВт+3МВар)	0.98	0.90	✓ Виконано

-16%

Падіння напруги
без CHE у вузлі 11

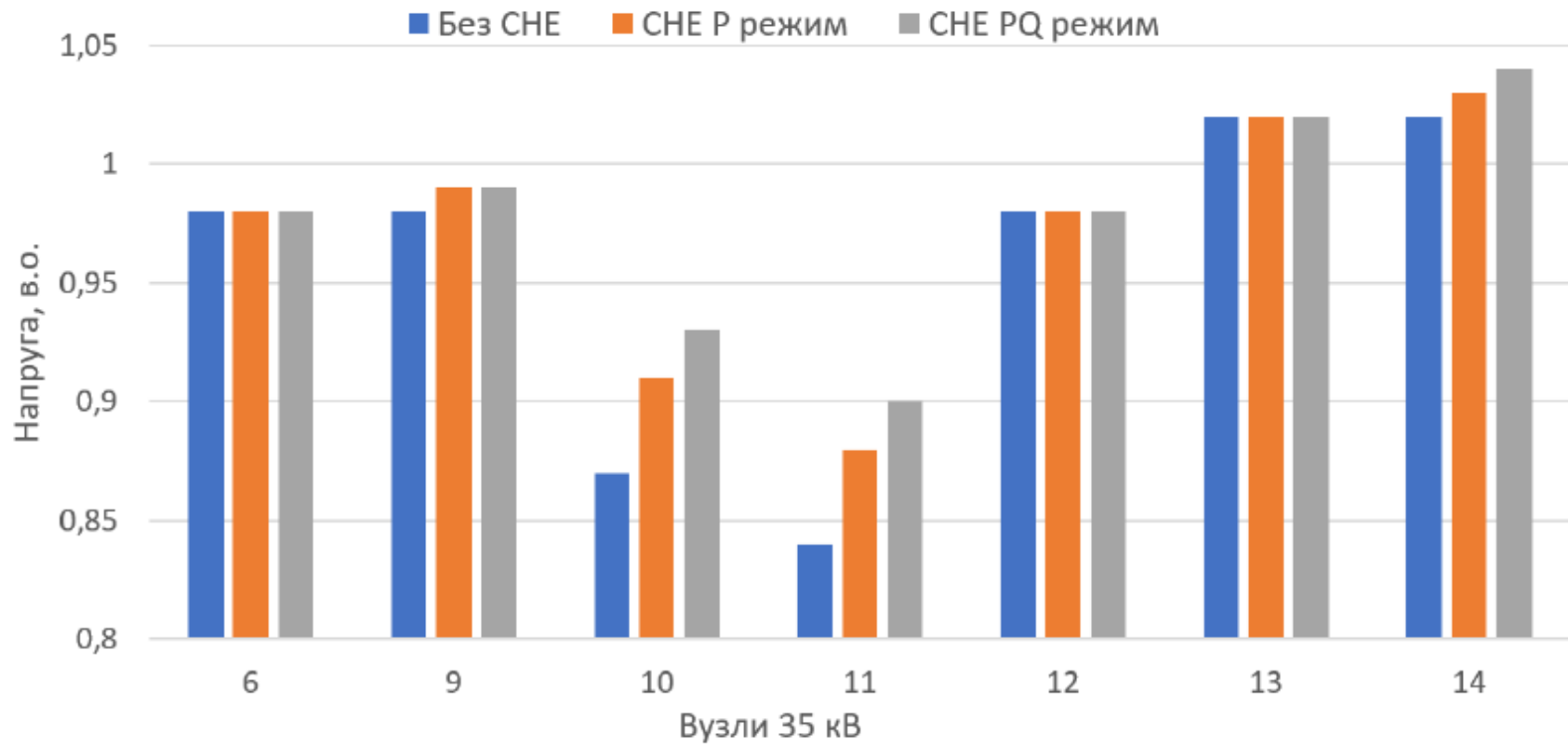
3 МВар

Мінімальний Q-резерв
для N-1

≥ 0.90

Напруга в усіх вузлах
при P+Q керуванні

Порівняння напруги по вузлах — три сценарії



Порівняння значень напруги при критерії N-1 та різних режимах роботи СНЕ

Ключові висновки

- P-only режим: напруга у вузлі 11 = 0.88 в.о. — норму не досягнуто
- V-mode (P=6 МВт + Q≈3 МВар): напруга ≥ 0.90 в.о. у всіх вузлах
- ~10% резерву S_ном на Q достатньо для виконання N-1
- **Додаткові FACTS-пристрої не потрібні**

Відповідність науковій літературі

- Saboori et al. (IEEE, 2025): критична роль реактивної підтримки від IBR у перехідних мережах
- Zeraati et al. (IEEE TSG, 2018): розподілене Q-керування BESS для регулювання напруги при PV
- Kamaludeen et al. (PESGM, 2023): BESS як VAR-джерело у розподільній підстанції Con Edison

01

Генерація виключно активної потужності СНЕ ($P=6.7$ МВт, $Q=0$) не забезпечує виконання умови N-1 — напруга у критичному вузлі 11 = 0.88 в.о. (норма ≥ 0.90)

02

Координоване P+Q керування ($P=6.0$ МВт, $Q\approx 3.0$ МВар) стабілізує напругу в усіх вузлах на рівні ≥ 0.90 в.о. без залучення FACTS

03

Показано, що перерозподіл $\sim 10\%$ від $S_{\text{ном}}$ інвертора на Q є достатнім і економічно ефективним рішенням для N-1 у 35 кВ мережах з ВДЕ

04

Подальший розвиток: алгоритм координованого P+Q керування СНЕ спільно з ВДЕ та ПКРП для реального часу

Дякую за увагу!

В.С. Карнаух

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»