

О. С. Яндульський, д. т. н., проф.; Г. О. Труніна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН ЕФЕКТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ІНВЕРТОРНИМ ПРИЄДНАННЯМ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Розглянуто підхід до визначення зон ефективного регулювання напруги за допомогою джерел розосередженої генерації з інверторним приєднанням у розподільній електричній мережі на основі аналізу чутливості напруги у вузлах мережі відносно зміни потужності в точці приєднання джерела. Досліджено, як на чутливість вузлів $dU/dQ_{\text{ДРГ}}$ впливає зміна положення РПН трансформаторів та які з цих вузлів є найчутливішими щодо цієї зміни. Таке дослідження дає змогу визначити, у яких випадках та на якому саме трансформаторі слід здійснювати перемикання положення РПН для того, щоб мінімізувати кількість реактивної потужності, яку джерело розосередженої генерації витрачає для регулювання напруги в електричній мережі з метою підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ. Для подальших досліджень сформовано цільову функцію оптимального регулювання напруги за рахунок координації роботи ДРГ та РПН трансформатора.

Ключові слова: розподільна електрична мережа, джерела розосередженої генерації, РПН трансформатора, зони ефективного регулювання напруги, реактивна потужність, чутливість.

Вступ

За останні роки частка розосередженої генерації (у цій роботі маємо на увазі альтернативні джерела енергії невеликої потужності, які розосереджені по електричній мережі) в ОЕС України значно збільшилась [1], і на сьогодні планують реалізацію значної кількості проектів підключення таких джерел до електричних мереж для подолання залежності від традиційних видів палива.

Під час інтеграції джерел розосередженої генерації (ДРГ) спостерігають їх значний вплив на роботу розподільної електричної мережі (РЕМ), на зміну її параметрів, зокрема на напругу, тому регулювання напруги в РЕМ під час функціонування в ній ДРГ є досить актуальним питанням.

Вимоги [2] регламентують випадки, у яких ДРГ з інверторним приєднанням можуть брати участь у регулюванні напруги за рахунок зміни активної та реактивної потужностей. Цьому питанню присвячено низку вітчизняних та зарубіжних робіт [3 – 6].

Для підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ доцільно координувати роботу станції з перемиканнями положення РПН трансформатора [7 – 8], тому в цій роботі пропонуємо визначити зони ефективного регулювання напруги за допомогою ДРГ та вузли впливу РПН трансформатора.

Регулювання напруги за допомогою ДРГ

Генерація активної потужності ДРГ може спричинити зростання напруги у вузлах РЕМ вище допустимої границі [9]. У такому випадку допускають, споживання реактивної потужності ДРГ з електричної мережі [3 – 6], але при цьому зростатимуть втрати потужності в РЕМ. Крім того, перехід ДРГ до часткового споживання або генерації реактивної потужності призводить до зниження генерації активної потужності станції (рис. 1) відповідно до співвідношення:

$$P_{\text{ДРГ}} = \sqrt{S_{\text{ДРГ}}^2 - Q_{\text{ДРГ}}^2}, \quad (1)$$

де $S_{\text{ДРГ}}$ – повна потужність ДРГ, $P_{\text{ДРГ}}$ – активна потужність, яку генерує станція, $Q_{\text{ДРГ}}$ – реактивна потужність, яку споживає або генерує ДРГ.

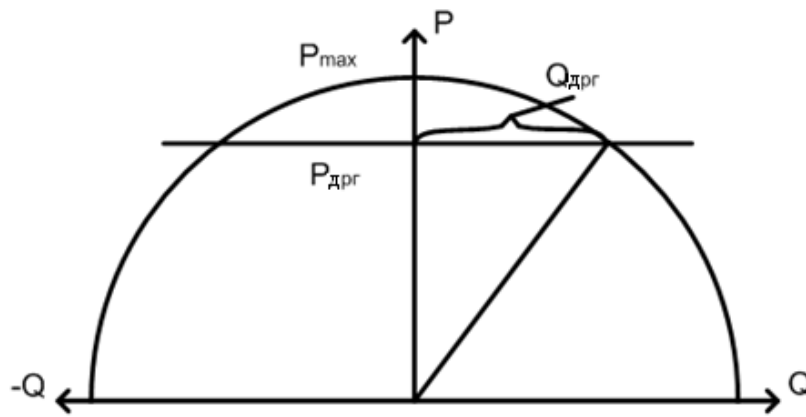


Рис. 1. Характеристика потужності ДРГ

З (1) випливає, що для уникнення зменшення генерації активної потужності ДРГ необхідно мінімізувати споживання реактивної потужності при утриманні напруги в допустимому діапазоні. На основі цього можна сформулювати цільову функцію:

$$P_{\text{дрг}} - \Delta P(Q)_{\text{дрг}} - \Delta P_{\text{дрг}} \rightarrow \max \quad (2)$$

$$\text{при } U_{\min} \leq U \leq U_{\max}, \quad (3)$$

де $P_{\text{дрг}}$ – активна потужність, яку генерує ДРГ; $\Delta P(Q)_{\text{дрг}}$ – величина активної потужності, на яку необхідно зменшити генерацію ДРГ для часткового регулювання його реактивної потужності (відповідно до (1)); $\Delta P_{\text{дрг}}$ – втрати активної потужності ДРГ в елементах станції: у трансформаторі приєднання, у лінії підключення і т. п. Напруга U повинна знаходитися в діапазоні допустимих значень (3).

Послідовність визначення зон ефективного регулювання напруги ДРГ та вибору трансформатора з РПН для підвищення ефективності регулювання

Виходячи з (2) і (3), доцільно знати зони, у яких регулювання напруги за допомогою ДРГ є найефективнішим, та яким чином на цю ефективність впливає зміна положення РПН трансформаторів, що розташовані поблизу ДРГ, а також яким саме трансформатором слід здійснювати перемикання РПН для підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

Для цього пропонуємо таке:

1. Провести розрахунок чутливості напруги в електричній мережі щодо зміни потужності ДРГ $dU_i/dQ_{\text{дрг}}$ та встановити вузли з найбільшою чутливістю – зони ефективного регулювання напруги ДРГ:

$$dU_i / dQ_{\text{дрг}} = [dU_1 / dQ_{\text{дрг}} \quad dU_2 / dQ_{\text{дрг}} \quad \dots \quad dU_{\text{дрг}} / dQ_{\text{дрг}} \quad \dots \quad dU_n / dQ_{\text{дрг}}] \quad (4)$$

де i – номер вузла РЕМ, $i = 1 \dots n$.

2. Розрахувати чутливість напруги у вузлах РЕМ щодо зміни положення РПН t -го трансформатора $dU_i/dtap_t$ (t – номер трансформатора), який розташований поблизу ДРГ:

$$dU_i / dtap_t = [dU_1 / dtap_t \quad dU_2 / dtap_t \quad \dots \quad dU_n / dtap_t], \quad (5)$$

де t – номер трансформатора, $t = 1, \dots, m$; i – номер вузла РЕМ, $i = 1 \dots n$.

3. На основі аналізу отриманих розрахунків чутливості визначити трансформатори з РПН, які мають вплив на найбільшу кількість вузлів серед чутливих вузлів відносно зміни потужності ДРГ (тобто, серед зон ефективного регулювання напруги ДРГ);

4. Для цих трансформаторів необхідно визначити коефіцієнти якості функціонування [10 – 11] і на основі цього обрати один трансформатор, регулювання якого сприятиме підвищенню ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

У [10 – 11] пропонують вибирати трансформатор з РПН для регулювання напруги, ґрунтуючись на визначенні його коефіцієнта якості функціонування, який враховує надійнісні характеристики трансформатора (зокрема залишковий ресурс), навантаження трансформатора та чутливість зміни втрат потужності в електричній мережі до перемикачів РПН саме цього трансформатора. Тобто перемикач потрібно здійснювати таким трансформатором, у якого коефіцієнт якості функціонування найвищий.

Отже, для мінімізації кількості споживання або генерації реактивної потужності ДРГ перемикач положення РПН слід здійснювати на трансформаторі, обраному в п. 4. Це дозволить максимізувати генерацію активної потужності ДРГ відповідно до (2) за співвідношенням (1) за утримання напруги в електричній мережі в допустимих межах.

Практична реалізація

Дослідження проводили в схемі фрагменту РЕМ Молочанського району Запорізької області. Схема має рівні напруг 150/35/10/6/0,4 кВ. Дослідження проводили у програмному комплексі PowerFactory. Схему представлено на рис. 2.

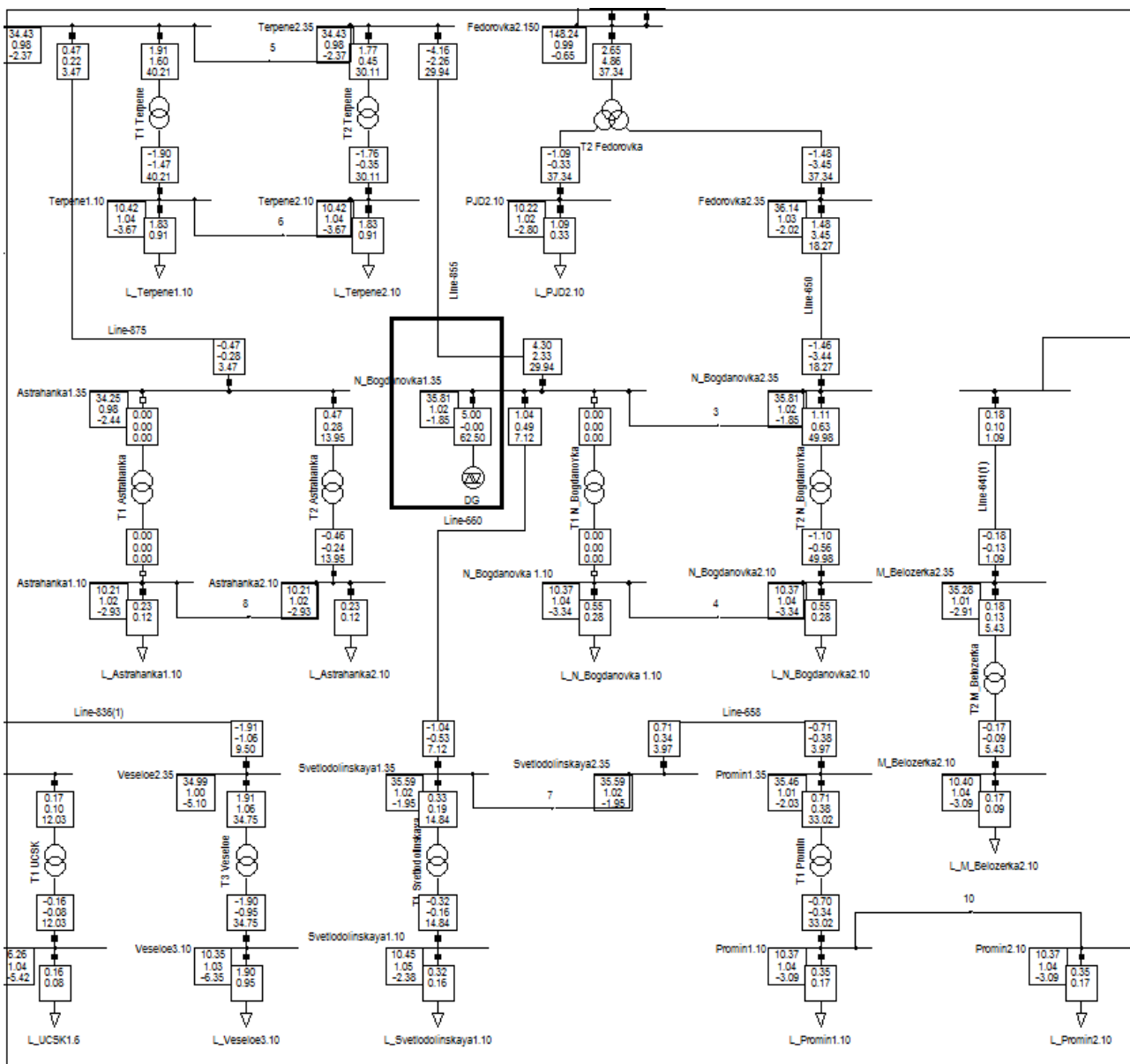


Рис. 2. Фрагмент РЕМ Молочанського району Запорізької області за наявності ДРГ

ДРГ потужністю 5 МВт підключено до вузла N_Bogdanovka1.35 кВ. У межах п. 2 – 4

розглядають трансформатори: T2 Fedorovka, T2 N_Bogdanovka, T2 Terpene, T1 Svetlodolinskaya.

Зазвичай виникає питання: у яких вузлах треба відслідковувати зміну напруги з метою ефективного регулювання напруги в РЕМ. Такі вузли повинні найбільш широко характеризувати зміну напруги у визначеному фрагменті РЕМ. Один із варіантів – спостерігати за напругою у вузлі підключення станції, але такий підхід не завжди буде коректним, оскільки в РЕМ навантаження та генерація весь час змінюються – і порушення допустимих меж по напрузі можуть виникнути не тільки у вузлі підключення ДРГ. Наприклад, у [12] пропонують відслідковувати значення напруги в тих вузлах, у яких заздалегідь проведено дослідження й визначено, що в них напруга може досягати максимального/мінімального значення за різних навантажень та генерацій. Це більш універсальний підхід.

Для визначення вузлів, у яких доцільно відслідковувати напругу проведено дослідження згідно з [12] і виявлено, що саме ці вузли є найбільш чутливими з огляду на розрахунок чутливості напруги у вузлах відносно зміни потужності в РЕМ, тому для визначення вузлів, у яких необхідно відслідковувати напругу достатньо знайти вузли з найбільшими значеннями чутливості. У цій роботі такими вузлами є Terpene1.10, Terpene2.10.

Із розрахунків (рис. 3) випливає, що найбільшу чутливість $dU_i/dQ_{ДРГ}$ щодо зміни реактивної потужності ДРГ мають вузли підстанцій: Astrahanka, N_Bogdanovka, Promin, Svetlodolinskaya, Terpene та вузол Fedorovka2.35 (табл. 1).

Саме ці вузли є зонами ефективного регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, а отже, зонами, у яких вплив ДРГ на напругу є найбільшим.

Чутливості напруги у вузлах РЕМ щодо зміни реактивної потужності ДРГ наведено на рис. 3.

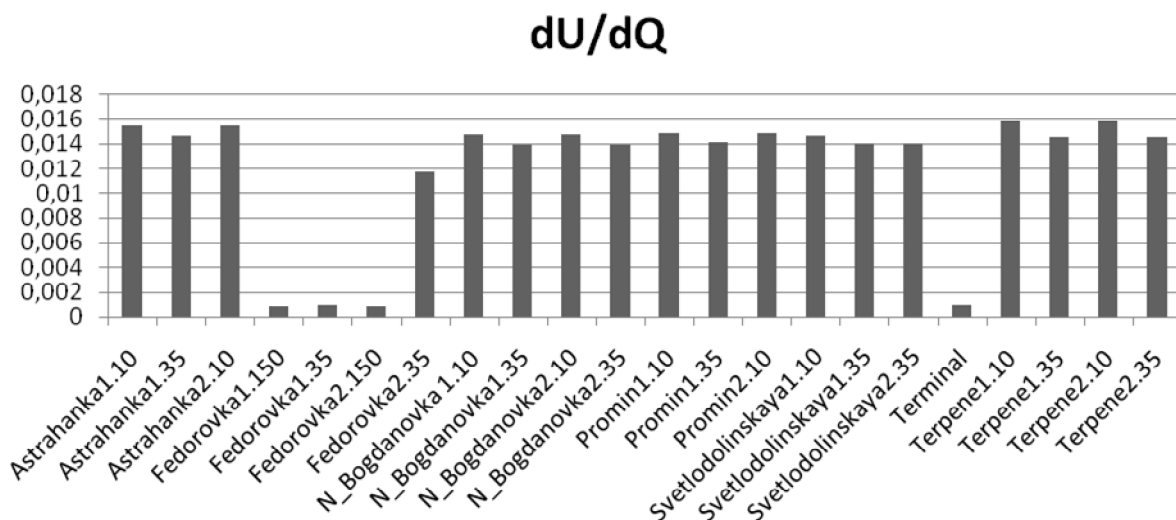


Рис. 3. Чутливості напруги у вузлах фрагменту РЕМ відносно зміни реактивної потужності ДРГ

Як зазначалося раніше, для того, щоб зменшити кількість споживаної реактивної потужності ДРГ з метою зменшення напруги до допустимих рівнів, а також для зменшення втрат потужності в РЕМ доцільно, окрім регулювання потужності ДРГ, змінювати положення РПН трансформатора. Але для цього потрібно знати, РПН саме якого трансформатора слід перемикаєти і як це регулювання впливатиме на чутливість вузлів $dU/dQ_{ДРГ}$.

Проведено розрахунки чутливості вузлів dU_i/dt_{apt} згідно з (5) для трансформаторів з РПН, що розташовані поблизу ДРГ: T2 Fedorovka, T2 N_Bogdanovka, T2 Terpene, T1 Svetlodolinskaya. Результати розрахунків проаналізовано та на їхній основі визначено трансформатор, який має вплив на найбільшу кількість вузлів, які входять у зону впливу ДРГ

(у зону ефективного регулювання напруги ДРГ). Результати розрахунку чутливості для трансформатора T2 Fedorovka наведено на рис. 4.

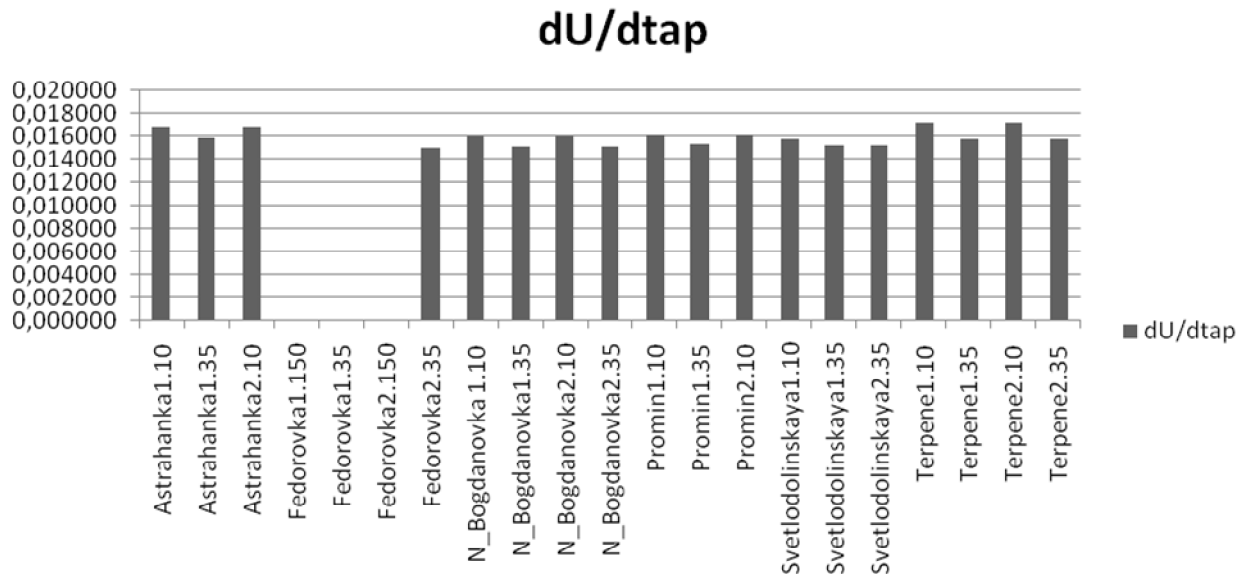


Рис. 4. Чутливість вузлів $dU_i/dtap_i$ щодо зміни положення РПН трансформатора T2 Fedorovka

Якби таких трансформаторів виявилось більше, тоді доцільно було б визначити їх коефіцієнти якості функціонування згідно з [10 – 11]. І після цього обрати трансформатор, у якого цей коефіцієнт найбільший.

Отже, перемикання РПН саме трансформатора T2 Fedorovka сприятиме зменшенню кількості реактивної потужності, яку ДРГ повинно затратити для регулювання напруги. І таким чином стає можливим максимізувати активну потужність генерації ДРГ згідно з (2) за утримання напруги в допустимих межах.

У подальшому дослідженні за дотримання умови (3) доцільно визначити таке оптимальне рішення, за якого максимізується активна потужність ДРГ за рахунок зменшення реактивної потужності згідно з (1) та мінімізується кількість перемикань РПН трансформатора для запобігання швидкого досягнення експлуатаційних границь системи регулювання. Якщо при цьому враховувати економічні затрати, цільова функція матиме вигляд:

$$C_{ДРГ} \cdot (P_{ДРГ} - \Delta P(Q)_{ДРГ} - \Delta P_{ДРГ}) - C_{РПН} \cdot N_{РПН} \rightarrow \max, \quad (6)$$

де $C_{ДРГ}$ – вартість 1кВт потужності ДРГ, згідно з документацією про «Зелений тариф»; $P_{ДРГ}$ – активна потужність ДРГ; $\Delta P(Q)_{ДРГ}$ – величина активної потужності, на яку необхідно зменшити генерацію ДРГ для часткового регулювання його реактивної потужності Q ; $\Delta P_{ДРГ}$ – втрати активної потужності ДРГ в елементах станції: у трансформаторі приєднання, у лінії підключення і т. п.; $N_{РПН}$ – кількість перемикань положення РПН трансформатора; $C_{РПН}$ – вартість одного перемикання РПН трансформатора, яка ґрунтується на вартості системи РПН та максимальній допустимій гарантійній кількості перемикань положення РПН трансформатора.

Висновки

У роботі розглянуто підхід до визначення зон ефективного регулювання напруги за допомогою джерел розосередженої генерації з інверторним приєднанням у розподільній електричній мережі на основі аналізу чутливості напруги $dU_i/dQ_{ДРГ}$ (i – номер вузла РЕМ, $i=1 \dots n$) у вузлах мережі відносно зміни потужності в точці приєднання джерела. Визначено, які трансформатори з РПН, розташовані поблизу ДРГ, мають вплив на найбільшу кількість вузлів, що входять у зону впливу ДРГ (в зону ефективного регулювання напруги ДРГ). Таке дослідження дозволяє визначити, у яких випадках та на якому саме трансформаторі необхідно здійснювати перемикання положення РПН для того, щоб мінімізувати кількість

реактивної потужності, яку джерело розосередженої генерації витрачає для регулювання напруги в електричній мережі з метою підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ. Для подальших досліджень сформовано цільову функцію оптимального регулювання напруги за рахунок координації роботи ДРГ та РПН трансформатора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зміни встановленої потужності ОЕС України [Електронний ресурс] : Режим роботи ОЕС України // Режим доступу:
http://www.ukrenergogov.gov.ua/ukrenergogov/control/uk/publish/article?art_id=149524&cat_id=35061.
2. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж [Електронний ресурс] // Режим доступу:
http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/Wind_and_Solar_PV_Tech_Req_Final_Version_Ukrainian.pdf.
3. Гаевский А. Ю. Стабилизация напряжения в сети путем компенсации реактивной мощности инверторами ФЭС / А. Ю. Гаевский, И. Э. Голентус // *Відновлювана енергетика XXI століття: XIV Міжнародна науково-практична конференція*. – 2013. – С. 243 – 247.
4. Masoud Farivar Inverter VAR Control for Distribution Systems with Renewables / Masoud Farivar // *Smart Grid Communications: IEEE International Conference*. – 17-20 Oct., 2011. – P. 457 – 462.
5. Sansawatt T. Integrating distributed generation using decentralised voltage regulation / T. Sansawatt, L. F. Ochoa, G. P. Harrison // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. – 2010 – P. 1 – 6.
6. Turitsyn K. Local Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators / K. Turitsyn, P. Sulc, S. Backhaus, M. Chertkov // *Smart Grid Communications: First IEEE International Conference*. – 2010. – P. 79 – 84.
7. Kim T. E. Voltage Regulation Coordination of Distributed Generation System in Distribution System / Kim T. E., Kim J. E. // *Power Engineering Society Summer Meeting*. – 15-19 July, 2001. – P. 480 – 484.
8. Caldón Roberto. Co-ordinated Voltage Regulation In Distribution Networks With Embedded Generation / Roberto Caldón, Silvano Spelta, Valter Prandoni, Roberto Turri // *Electricity Distribution: 18th International Conference*. – 6-9 June, 2005. – P. 1 – 4.
9. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введен с 1999-01-01]. – Межгосударственный стандарт, 1999. – 31 с.
10. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з врахуванням нормативного значення технічних втрат електроенергії та технічного стану трансформаторів з РПН / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. О. Рубаненко // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. – 2013. – № 1 (14). – С. 168 – 172.
11. Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з врахуванням технічного стану трансформаторів із РПН [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – № 4. – 2012. Режим доступу до журн.:
<http://prac.vntu.edu.ua/article/view/2657/2856>.
12. Shady A. Power quality assessment via coordinated voltage control in distributed power generation / Shady A., El-Kashlan, Hussien El-Desouki Saied // *Power International Journal of Electrical and Power Engineering*. – 2009. – № 3 (6). – P. 289 – 295.

Яндульський Олександр Станіславович – д. т. н., проф., декан факультету електроенергетичної та автоматики, e-mail: yandu_kpi@ukr.net, тел.: (044) 236-41-11.

Труніна Ганна Олексіївна – аспірант, асистент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: trunina.aa@mail.ru, тел.: (044) 406-86-14.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».