

AN INNOVATIVE METHOD FOR MINIMIZING VOLTAGE FLUCTUATIONS IN DISTRIBUTED POWER SUPPLY SYSTEMS

S. Baliuta, V. Shesterenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Alternating voltage
Harmonics
Power supply system
Voltage regulator*

Article history:

Received 16.09.2024
Received in revised form
30.09.2024
Accepted 08.10.2024

Corresponding author:

S. Baliuta
E-mail:
epp11@ukr.net

Citation: Балюта С. М.,
Шестеренко В. Є. (2024).
Інноваційний метод міні-
мізації коливань напруги
в розосереджених систе-
мах електрозабезпечення.
Наукові праці НУХТ, 30(5),
122—130.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-5-10

ABSTRACT

In distributed sources of power supply there are constantly conditions in which the voltage can change at a high speed. For example: gusty wind in the area where a wind power plant is installed, small clouds moving over a solar power plant. In the electricity standard, such changes in voltage are introduced as "fluctuations" voltage.

The effect of low-quality voltage are electromagnetic and technical losses. That is results in increasing expenses on power and energy, reduction of the equipment operating cycle, process losses, which include reducing production, decreasing product quality and production of low-quality products

Thus, the voltage deviation is one of the major problems in power supply systems of industrial enterprises. Its solution is a priority task in the design of power supply systems. The ways of improving the efficiency of food production by reducing process losses caused by defective voltage were studied. The way to improve voltage quality was suggested.

The systematic approach to voltage regulation that allows increasing economic performance of energy sources was introduced. The most promising is the regulation method acting on voltage and reactive power.

Deviation of current waveform and sinusoid voltage was studied by using harmonic components (harmonics) according to the mathematical theory established by Fourier (1768—1830). The term "harmonic" is used in acoustics to refer to string vibrations with a frequency multiplied to the fundamental frequency of vibrations. Higher harmonics have negative effect on all types of electrical equipment, even at a considerable distance from the harmonic generation. They create additional noise in telecommunication, leading to false replies of responsive equipment. The problem of higher harmonics is the main problem of electromagnetic compatibility of electrical equipment due to the increased power of thyristor converters and the widespread use of electronic automatic control systems that are sensitive to the shape of the sine wave voltage. If power network voltage, where the installation of a switching regulator is planned, is non-sinusoidal, there is a real opportunity to use a voltage regulator to minimize higher harmonics.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-5-10

ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД МІНІМІЗАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ В РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

С. М. Балюта, В. Є. Шестеренко

Національний університет харчових технологій

У розосереджених джерелах електрозабезпечення (РДЕ) постійно виникають умови, при яких величина напруги може змінюватися з великою швидкістю. Наприклад, поривчастий вітер на місцевості, де змонтована вітроелектростанція (ВЕУ), невеликі хмари, що рухаються над сонячною електростанцією (СЕС). В стандарті на електроенергію такі зміни напруги визначаються, як «коливання напруги».

Вплив неякісної напруги на електромагнітні й технологічні втрати проявляється у зростанні втрат потужності та енергії, зменшенні терміну служби обладнання, технологічних збитках, що включають зменшення продукції, зниження якості продукції, випуск неякісної продукції.

Колівання напруги є однією з найважливіших проблем у системах електропостачання промислових підприємств. Її вирішення є пріоритетним завданням при проєктуванні систем електрозабезпечення. Розглянуто шляхи підвищення ефективності харчових виробництв за рахунок зниження технологічних втрат, викликаних неякісною напругою. Запропоновано спосіб підвищення якості напруги, системний підхід до регулювання напруги, що дає змогу підвищити економічні показники джерел енергії. Найперспективнішим є метод регулювання шляхом дії на напругу і на реактивну потужність.

Відхилення форми кривих струму і напруги від синусоїди розглядають за допомогою гармонічних складових (гармонік) за математичною теорією, створеною Фур'є (1768—1830). Термін «гармоніка» використовується в акустиці для позначення коливань струни з частотою, кратною основній частоті коливання. Вищі гармоніки негативно діють на електрообладнання всіх видів, навіть на значній відстані від місця генерації гармонік. Вони створюють додатковий шум у телефонному зв'язку, призводять до помилкових спрацювань відповідальної апаратури. Проблема вищих гармонік — це основна частина проблеми електромагнітної сумісності. Регулювання напруги забезпечує компенсацію втрат напруги у системі електропостачання з метою підтримування заданої якості напруги на затискачах електроприймачів. В енергосистемі можливості регулювання обмежені вимогами стійкості паралельної роботи генераторів. Регулятор напруги може використовуватися для мінімізації рівня вищих гармонік.

Ключові слова: коливання напруги, вищі гармоніки, система електрозабезпечення, регулятор напруги.

Постановка проблеми. Широке впровадження в електричних мережах відновлювальних джерел енергії (фотоелектростанцій і вітроелектростанцій), а також встановлення станцій зарядки електромобілів великої одиничної потужності призводить до суттєвого погіршення показників якості електричної енергії (коливань

напруги у споживачів та появи імпульсів перенапруги). Коливання напруги призводять до суттєвих збитків у споживачів. Енергопостачальна компанія може компенсувати ці збитки, але для цього необхідно визначити характеристики коливань відповідно з чинним стандартом. Оскільки в діючих мережах відсутні ефективні пристрої захисту від коливань напруги та імпульсів перенапруги, необхідно розробити засоби захисту електронних пристроїв споживачів від різких коливань напруги та імпульсів перенапруги.

Огляд останніх досліджень і публікацій. При збільшенні кількості та потужності альтернативних джерел розосередженої генерації в електричних мережах відбувається погіршення показників якості електричної енергії за рахунок наявності частотних перетворювачів електричної енергії. До альтернативних джерел відносяться вітрові, сонячні та малі гідроелектростанції. Розподілені джерела енергії в електричній мережі впливають на режими її роботи, в результаті чого виникають нові можливості і нові задачі щодо оптимального використання розподілених джерел енергії (РДЕ) (Jung, Onen, Arghandeh, & Broadwater, 2014). РДЕ постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі появи надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання (Sara-bia, 2018). РДЕ умовно можна поділити на керовані (дизельні електричні станції, когенераційні тощо), умовно керовані (малі ГЕС за відсутності достатньої для безперервної роботи кількості води) і некеровані, наприклад, ВЕС і СЕС (Huber, Dimkova, & Namacher, 2014). Кількість РДЕ з кожним роком зростає, що призводить до виникнення ситуації, коли в електричній мережі можуть експлуатуватись декілька різнотипних РДЕ, серед яких некеровані і умовно керовані (Hrishaeksha, & Sharma, 2020). Розподілене генерування також може бути джерелом вищих гармонік у мережі. Гармоніки можуть бути або з самого генератора (синхронного генератора) або від обладнання силової електроніки, такого як інвертори. При широкому впровадженні РДЕ в окремих випадках централізована система електропостачання перетворюється в децентралізовану (Salles, Jiang, Xu, Freitas, & Mazin, 2015). Впровадження джерел розосередженої генерації характеризується різким збільшенням силових електронних систем, що призводить до погіршення якості електричної енергії. При приєднанні нових джерел РГ змінюється система перетікань потужності та рівні напруги в мережі. Вказані джерела є нестабільними в тому плані, що в кожен момент часу первинні джерела ВДЕ (вітер і сонце) є нестабільними. Можна побудувати сонячні модулі, які будуть повертатись за сонцем і зробити більш досконалі вітряки, що врахують напрямок вітру, однак на наявність або відсутність хмар людина поки що впливати не навчилась (Juelsgaard, Bendtsen, & Wisniewski, 2017). Причинами такого погіршення показників якості електричної енергії в електричній мережі, наряду з впровадженням джерел розосередженої генерації (генерація в електричну мережу гармонік, інтер- та субгармонік), є також наявність у споживачів потужних нелінійних, несиметричних навантажень з різкозмінним режимом роботи. До таких навантажень відносяться дугові електросталеплавильні печі, потужні прокатні стани, електрозварні пристрої тощо (Shen, Jiang, & Li, 2015).

Вказані навантаження негативно впливають на якість електричної енергії систем електропостачання, до яких вони підключені. Це обумовлено тим, що характер споживання ними активних і реактивних потужностей відповідає їх різкозмін-

ним, повторно-короткочасним режимам роботи, що призводить до коливань напруги. Коливання напруги, у свою чергу, призводять до модуляції у часі амплітуд і фаз складових струму як основної, так і вищих гармонік, які генеруються в електричну мережу.

Мета дослідження: створити пристрій, що забезпечить зменшення до мінімуму небезпечних наслідків коливань напруги.

Матеріали і методи. Методи математичної статистики та моделювання, прогнозування, яке використовується для визначення залишкового ресурсу та теорія нечіткої логіки.

Викладення основних результатів дослідження. Коливання напруги, згідно із стандартом 13109-97, прийнятим в Україні, характеризуються трьома величинами: розмахом зміни напруги, частотою зміни напруги й інтервалом часу між змінами напруги.

Розмах зміни напруги — це різниця між екстремумами, що йдуть один за одним, обвідної діючих значень. Якщо обвідна має горизонтальні ділянки, розмах зміни напруги визначається як різниця між сусідніми горизонтальними ділянками:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{\sqrt{2}U_{ном}} 100\%.$$

Частота повторювань змін напруги при періодичних коливаннях:

$$F = \frac{m}{T},$$

де m — кількість змін напруги за час T .

Гранично допустиме значення суми усталеного відхилення напруги та розмаху коливань напруги в точках приєднання до електричної мережі напругою 0,38 кВ дорівнює $\pm 10\%$ номінальної напруги.

Для характеристики коливань напруги стандарт 13109-97 вводить поняття дози флікера — інтегральна характеристика коливань напруги, що викликають у людини роздратування миготінням світла, яке накопичується за встановлений період часу.

Дозу флікера визначають з допомогою спеціального приладу — флікерметра. Для будь-якої силової мережі напругою 660...380 В коливання напруги мають бути не нижчими 85% від $U_{ном}$. Інакше може трапитися вимкнення магнітних пускатрів, контакторів, реле. Коливання напруги можуть викликати нестабільність роботи синхронних двигунів і вихід їх із синхронізму. Коливання напруги призводять до зміни моменту на валу двигунів і скорочують їх термін служби (Шестеренко, 2017). Комбіноване електропостачання, коли безпосередньо в розподільних електричних мережах розбудовуються відновлювані джерела енергії (Tran, & Vaziri, 2005), призводить до появи великої кількості додаткових взаємозв'язків, суттєво впливає на потоки потужності в системах електропостачання і, в кінцевому випадку, на якість електричної енергії (Morstyn, Hredzak, & Agelidis, 2018). При цьому порушується технологічний процес на виробництвах, де потрібна стабільна частота обертання (двигуни ткацьких машин). Коливання напруги викликають миготіння ламп, що спричинює зниження продуктивності праці внаслідок стомлюваності очей, особливо на складанні точних механізмів, у креслярських

роботах. Ступінь впливу коливань напруги на зір залежить від швидкості змін напруги та абсолютного значення цих змін (розмах коливань). При коливаннях нечітко сприймаються деталі предметів, графічні зображення, що впливає на продуктивність праці.

При суттєвих розмахах порушується робота люмінесцентних ламп, виходять з ладу конденсатори та вентиля перетворювальних агрегатів, руйнуються магнітопроводи індукційних нагрівачів, порушується робота систем автоматичного управління синхронних двигунів. При живленні печей з тиристорним регулюванням відбувається нестійкий режим роботи автоматичного регулювання.

Значні розмахи викликають коливання електромагнітного моменту генераторів електростанцій, це негативно позначається на економічних показниках станції в цілому, нестійко працює автоматичне регулювання збудження генераторів, помилково спрацьовує форсування збудження.

Коливання напруги призводять до вібрації двигунів, насосів, трубопроводної арматури. Знижується міцність металу, скорочується термін його служби. При коливаннях з частотою 1 Гц термін служби трубопроводів унаслідок пульсацій напору насосів скорочується на 5...7%.

Як різновидність коливання напруги можна розглядати тимчасову перенапругу, імпульс напруги та провал напруги.

Таблиця 1. Очікуване значення імпульсу напруги згідно з ДСТУ 3109-97

Номінальна напруга, кВ	0,38	3	6	10	20	35	110	220
Комутаційна імпульсна напруга, кВ	4,5	15,5	27	43	85,5	148	363	705

Значення грозових імпульсних напруг з імовірністю 90% не перевищує 10 кВ в повітряних ЛЕП напругою 0,38 кВ та 6 кВ у внутрішніх електропроводах будинків і споруд. Тому необхідно у всіх мережах, які живлять електронні пристрої (комп'ютери, телевізори), встановлювати обмежувачі перенапруги.

Звичайно при оцінці впливу якості електроенергії виділяють дві складові: електромагнітну й технологічну. Електромагнітна складова зв'язана зі зміною втрат енергії при передачі. Електромагнітна складова більше пов'язана з нормально допустимими показниками, технологічна складова — з максимально допустимими показниками якості.

Найефективнішим засобом боротьби з коливаннями напруги є безінерційний трансформаторно-тиристорний регулятор напруги, створений на базі трифазного вольтодобавочного трансформатора з трьома обмотками збудження EW_1 , EW_2 та EW_3 (рис. 1).

Виконавчі органи всіх регуляторів можна поділити на три групи: електромеханічні, електромагнітні та напівпровідникові (електронні). Застосування тиристорів для регулювання напруги виявляється економічно виправданим у разі великого числа перемикачів за рік. Тиристори можна використовувати в двох напрямках: перший — використовуються як силові комутуючі елементи; другий — тиристори в силових колах, що використовуються для плавного безінерційного

регулювання напруги в заданому діапазоні. Застосування напівпровідникових приладів дає змогу усунути ряд недоліків механічного регулювання напруги (невисоку швидкість, низький ресурс).

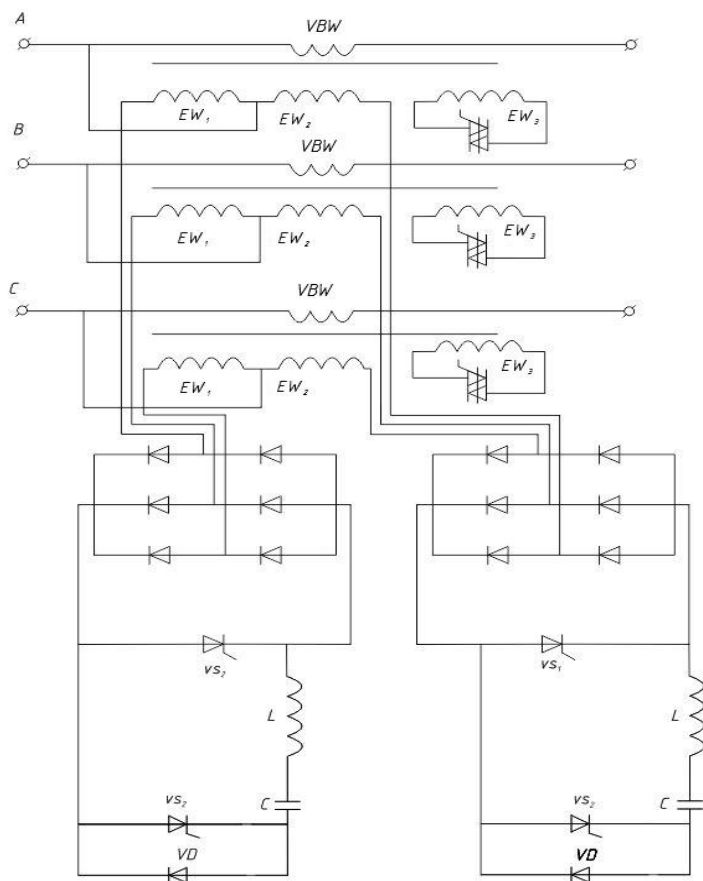


Рис. 1. Принципова схема універсального мостового трифазного регулятора напруги на тиристорах та симисторах (патент України на винахід № 104080)

Переваги тиристорних виконавчих органів загальновідомі. Але ефект напівпровідникового регулювання суттєво знижується внаслідок спотворення синусоїди напруги та струму. Необхідно шукати методи та пристрої з малим, допустимим для електричних мереж ступенем спотворення синусоїди вищими гармоніками.

Запропонований спосіб подачі напруги у вигляді послідовності імпульсів, висота яких змінюється за синусоїдальним законом, а ширина — за лінійним. Згідно із загальноприйнятою класифікацією цю напругу можна розглядати як один із видів амплітудно-імпульсної модуляції (АІМ) зі змінною шириною імпульсів і стабільною амплітудою моделюючої напруги.

До основних параметрів, що характеризують цей вид АІМ, відносять коефіцієнт послідовності імпульсів m , що дорівнює числу імпульсів в одному періоді напруги модуляції, частота якої дорівнює частоті мережі:

$$m = f_n/f,$$

де f_n — несуча або модульована частота.

Використання напруги з АІМ призводить до спотворення форми напруги $U_{вих}$. Ступінь спотворення можна визначити кількома способами. Основним критерієм оцінки несинусоїдальності напруги є гармонічний склад напруги на виході регулятора.

Одним із важливих параметрів АІМ є скважність:

$$Q' = (t_i + t_n)/t_n,$$

де t_i — тривалість імпульсу; t_n — тривалість паузи між імпульсами.

Скважність для напруги добавки може змінюватися в таких межах:

$$1 \leq Q' \leq \infty,$$

що викликає труднощі при дослідженні АІМ. Тому як параметр, що характеризує регульовальну властивість імпульсного регулятора, прийнято ступінь регулювання ψ — величина, що зворотна скважності:

$$\psi = 1/Q'.$$

Враховуючи, що α характеризує тривалість імпульсів, ступінь регулювання визначається як:

$$\psi = \alpha m / 2\pi.$$

Діюче значення напруги добавки плавно регулюється синхронною зміною ширини всіх імпульсів. При цьому можуть існувати три способи широтного регулювання:

- а) одностороннє шляхом зміщення задніх фронтів;
- б) двостороннє шляхом одночасного зміщення передніх і задніх фронтів;
- в) одностороннє при зміщенні тільки передніх фронтів.

Усі три види регулювання при $m = 6$ дали практично однакові результати, і три криві $k_{нес} = f(a)$ при односторонньому регулюванні за рахунок зміщення переднього та заднього фронтів і двостороннього регулювання збігаються.

Отже, криву $k_{нес} = f(a)$ не можна вважати визначальною характеристикою при виборі способу регулювання.

Важливо дослідити режим роботи виконавчого органу при трьох видах регулювання і вибрати такий спосіб, який забезпечив би максимальне використання потужності ВДТ без ускладнення інших елементів регулятора.

При всіх трьох видах регулювання необхідною та достатньою умовою симетрії напруги на виході регулятора та відсутності постійної складової в $U_{вих}$ є вибір коефіцієнта послідовності імпульсів таким, що дорівнює або ж є кратним шести.

Остаточний вибір значення несучої частоти f_n можна виконати, встановивши зв'язок між коефіцієнтом послідовності імпульсів і несинусоїдальністю напруги на виході.

Вважаючи, що напруга мережі синусоїдальна, можна записати, що в напрузі на виході регулятора:

$$\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 = U_D^2 - U_{D1}^2,$$

де U_D^2 , U_{D1}^2 — відповідно, діючі значення напруги, що індукована у ВВВ і діючі значення першої гармоніки цієї напруги.

Оскільки імпульси напруги добавки промодульовані по синусоїді, діюче значення напруги добавки в загальному випадку має вигляд:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sum_{s=1}^m \int_{Q'_s}^{Q''_s} U_M^2 \sin^2 \theta d\theta}.$$

Після перетворень, враховуючи, що m кратне шести, одержимо вираз, дійсний для будь-якого з трьох видів регулювання.

$$U_d = U_M \cdot \sqrt{\frac{m\alpha}{4\pi}}.$$

Отже, кожен із видів регулювання забезпечує підтримання нормативних показників якості електричної енергії в системах електрозабезпечення з ВДЕ. Найбільш ефективний спосіб регулювання визначається, зважаючи на техніко-економічних показників усіх видів регулювання.

Висновки

Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі регулювання напруги. Зниження якості електроенергії проявляється у зростанні втрат потужності та енергії, зменшення терміну служби обладнання, технологічних збитках, що включає в себе зменшення якості продукції, випуску неякісної продукції.

Застосування напівпровідникових приладів дає змогу усунути ряд недоліків механічного регулювання напруги (невисоку швидкодію, низький ресурс) і залишити основну його перевагу — синусоїдність форми напруги.

Безінерційність роботи регулятора дасть змогу підвищити стабільність роботи локальних мереж розосередженої системи електрозабезпечення.

Лінійна регульовальна характеристика імпульсного регулювання напруги — це одна з переваг способу регулювання напруги, оскільки спрощує схему керування та підвищує стабільність роботи регулятора.

Література

- Правила улаштування електроустановок (2017). Х.: «Форт».
- Правила користування електричною енергією. Затверджено постановою НКРЕ 31.07.2005 № 910. Зареєстровано в міністерстві юстиції України 18.11.2005 № 1399/11679.
- Шестеренко, В. Є. (2017). *Проектування систем електропостачання*. К.: ПП «К».
- Huber, M., Dimkova, D., & Hamacher, T. (2014). Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements. *Energy*, 69, 236—246. Взято з <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214002680>.
- Hrisheekesha P., & Sharma J. (2020). Evolutionary algorithm based optimal control in distribution system with dispersed generation. *International Journal of Computer Applications*, 14, 31—37. DOI: 10.5120/305-471.
- Juelsgaard, M., Bendtsen, J., & Wisniewski, R. (2017). Utilization of Wind Turbines for Upregulation of Power Grids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7), 2851—2863. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2275978.
- Jung, J., Onen, A., Arghandeh, R., & Broadwater, R. (2014). Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits. *Renewable Energy*, 66, 532—540. DOI: 10.1016/j.renene.2013.12.039.
- Morstyn, (T), Hredzak, (B), & Agelidis, V. (2018.) Network Topology Independent Multi-Agent Dynamic Optimal Power Flow for Microgrids with Distributed Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 3419—3429. DOI: 10.1109/TSG.2016.2631600.
- Mousavi, O. A., & Cherkaoui, R. (2019). Investigation of P-V and V-Q based optimization methods for voltage and reactive power analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 769—778. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.06.060.

Salles, D., Jiang, C., Xu W., Freitas, W., & Mazin, H. E. (2015). Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads — Part I: Methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 1937—1946. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2207132.

Sarabia, A. F. (2018). Impact of distributed generation on distribution system. (Masters Dissertation). Department of Energy Technology, Aalborg, Denmark. Взято з <https://projekter.aau.dk/projekter/files/52595515/>.

Shamtsyan, M., Klepikov, A. (2016). Some prospects of pulsed electric field treatment in food processing. *Journal of Food and Packaging Science. Technique and Technologies*, 2(1), 60—64. Взято з https://www.researchgate.net/profile/Nedyalka-Valcheva/publication/333853039_Mikroflora_na_lecebni_i_izvorni_vodi_v_Blgaria/links/5d08fc1da6fdcc35c1579632/Mikroflora-na-lecebni-i-izvorni-vodi-v-Blgaria.pdf#page=58.

Shen, J., Jiang, C., & Li, B. (2015). Controllable Load Management Approaches in Smart Grids. *Energies*, 8(10), 11187—11202. DOI: 10.3390/en81011187.

Tran, K., & Vaziri, M. (2005). Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 3, 2360—2364. DOI: 10.1109/PES.2005.1489235.

Yi-Chung, Hu. (2016). Electricity consumption prediction using a neural- network-based grey forecasting approach. *Journal of the Operational Research Society*, 68, 1259—1264.