fУДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ З ДИЗЕЛЬ ГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bialobrzeski@ukr.net, orcid.org/0000-0003-1669-4580;

ОЛІЙНІЧЕНКО М.Ю. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6651-0175;

ВОРОНА В.В. магістрант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: vvlaalvv@gmail.com, orcid.org/0009-0004-4899-9367;

ЯКИМЕЦЬ С.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ysm@meta.ua, orcid.org/0000-0002-2797-2796.

Мета роботи. *Дослідження симетричних складових струму та напруги в елементах мікромережі з автономним синхронним генератором обмеженої потужності, який працює паралельно з мережевим трансформатором за умови несиметричного навантаження.*

Методи дослідження. *Під час проведення дослідження використано методи візуального програмування в пакеті Simulink/Matlab, методи теорії електротехніки в частині визначення симетричних складових струмів та напруг в гілках спостереження, методи синтезу схем заміщення елементів електроенергетичних систем для симетричних складових струмів, методи обробки даних та побудови діаграм з використанням профільних програмних засобів.*

Отримані результати. *В результаті аналізу відомих досліджень встановлено, що за умови дослідження генеруючих систем малої потужності в умовах несиметрії недостатньо уваги приділяється характеру несиметричного навантаження. З використанням відомої структури мікромережі, яка включає синхронний генератор, машинне навантаження та трансформатор зовнішньої мережі, побудовано її модель в якій шляхом введення несиметричного навантаження різного типу реалізовано серії експериментів з реєстрацією напруг та струмів прямої, зворотньої та нульової послідовностей в гілках мережі. Аналіз отриманих в ході дослідження результатів встановив, що напруга прямої послідовності у разі зміни активного навантаження не змінює свого рівня, за тих же обставин у разі активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження зміна напруги має протилежний характер. У разі зростання несиметрії активно-індуктивного характеру напруга прямої послідовності знижується, а у разі активно-ємнісного збільшується. Зазначені зміни в деяких випадках перевищують 3%. Струми прямої послідовності у разі небалансу активного навантаження відрізняються незначним чином. У разі прямої послідовності струму трансформатора спостерігається безперервне його зростання, яке у випадку активно-ємнісного, та активно-індуктивного навантаження перевищує активне в середньому в 1,5 рази. Струми нульової послідовності в досліджуваній моделі, які утворені несиметричним навантаженням, повністю замикаються на трансформатор, викликаючі напруги нульової послідовності, а характер несиметричного навантаження суттєво впливає на значення цих струмів, відмічене зростання на 61%.*

Наукова новизна. *Встановлено, що в мікромережі, яка включає синхронний гененератор, машинне навантаження, симетричне активне навантаження, співставної з генератором потужності, трансформатор зовнішньої мережі, окрім самого факту несиметрії викликаної несиметричним навантаженням суттєвий вплив на симетричні складові має і характер несиметричного навантаження (активний, активно-індуктивний чи активно-ємнісний).*

Практична цінність. *За умови використання в мікромережах пристроїв які забезпечують підвищення якості електричної енергії, наприклад симетруючих, необхідно прийняти до уваги окрім фактору несиметрії ще й характер навантаження, яке останню викликає.*

Ключові слова: несиметричне навантаження, симетричні складові, активно-індуктивне навантаження, активно-ємнісне навантаження..

© Бялобржеський О.В., Олійніченко М.Ю., Ворона В.В., Якимець С.М., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-3-5

I. ВСТУП

В мікромережі в якій основним джерелом електроенергії являються сонячні, вітрові та інші альтернативні джерела електроенергії часто для підтримання стабільного електропостачання використовують дизельні генератори. Така мікромережа може працювати як автономно так і бути підключеною до іншої мережі [1]. Не зважаючи на переваги в наявності дизельного генератора для мікромережі існує багато технічних аспектів і проблем, які ще не до кінця вивчені та вирішені. Одним з таких питань являється стабільність роботи мікромережі при несиметричному навантаженні. Дослідження в напрямку стабільності роботи мікромережі проводилися, але систематичних аналізів систем розподілу в несиметричних умовах не було достатньо проведено [2].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботах [3] та [4] розглядається якість напруги при наявності несиметричного навантаження в ізольованій мікромережі з синхронним генератором, а саме відношення амплітуд зворотної та прямої послідовностей. Запропоновано підхід для усунення зворотної послідовності з використанням методу компенсації затримки та використання ПІ контролера. Ефективність методу підтверджується результатами [3], при вихідному дисбалансу напруги 7,5%, ступінь збалансованої напруги становить 0,17%. В роботі [5] вводиться система джерела напруги на основі перетворювача постійного струму високої напруги, яка з використанням методу розділу прямої та зворотної послідовностей фільтром комплексного коефіцієнта, може ефективно зменшити дисбаланс напруги та покращити якість електроенергії, ефективність підтверджується результатами, коефіцієнт не симетрії складає 1% після компенсації. Автори не розглядають взаємний вплив на рівень небалансу елементів електроенергетичної системи за умови різного рівня реактивної потужності та її характеру. В роботі [6] розглядається метод формування більш пропорційного розподілу несиметричного струму в ізольованій розподільній мережі за рахунок розділення компонентів прямої та зворотної послідовності. Отримані результати в ході дослідження підтверджують ефективність покращення розподілу не симетрії струмів в ізольованій розподільчій мережі, але при цьому не приділяється увазі фактору дефіциту чи надлишку реактивної потужності.

Дослідники [7] зазначають, що вітрові турбіни відчувають значні незбалансовані навантаження під час роботи, що посилюються зовнішніми обуреннями, які впливають на вихідну потужність. Це викликає необхідність вдосконалення систем регулювання режимом автономної енергетичної установки. Для усунення небалансу розробляються ємнісні балансуючі пристрої [8], які стають корисними в сучасних розподільчих мережах з високим вмістом джерел розподіленої енергії, де неврівноважені передачі потужності в мережу вищої напруги відбуваються все частіше в результаті надлишкової потужності, що виробляється. Однак у такому разі необхідно враховувати характер реактивної потужності створюваної пристроєм компенсації. Незбалансоване трифазне навантаження та незбалансований опір мережі є прикладами проблем незбалансованої мережі, які досліджені в роботі [9]. Реальна та реактивна потужність, що подається в мережу, коливається на значну величину в цих незбалансованих умовах. За результатами досліджень автори пропонують метод двоспрямованого управління реальною та реактивною потужністю трифазного інвертора, підключеного до мережі, в умовах незбалансованої мережі. Для розрахунку опорних струмів інвертора з компонентів негативної та нульової послідовності вимірюваних струмів використовується підхід вилучення симетричних компонентів у часовій області. Пропонований підхід коригує незбалансовані мережні струми та незбалансовані напруги РСС та забезпечує бажану реальну та реактивну потужність для мережі за наявності незбалансованих ситуацій.

Таким чином узагальнюючи вище наведені дослідження відзначимо, що дослідження впливу несиметричного навантаження проводяться і наводяться методи для ефективного вирішення незбалансованості напруги в розподільчій мережі, як в ізольованій мережі, так і в мережі яка з'єднана з зовнішньою мережею. Але при цьому питання впливу ємнісного чи індуктивного характеру реактивної потужності в подібних системах залишається недослідженим.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження симетричних складових струму та напруги в елементах мікромережі з автономним синхронним генератором обмеженої потужності, який працює паралельно з мережевим трансформатором за умови несиметричного навантаження.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розглянемо комплекс дизель-генераторної системи [10] з навантаженням та зовнішньою мережею за структурою представленою на рис. 1, яка складається з таких елементів: дизельного двигуна (ДД), системи збудження (СЗ), синхронної машини (СМ), навантаження (Н), несиметричного навантаження (НН), трансформатора з заземленою нейтралю (ТР) та мережі.

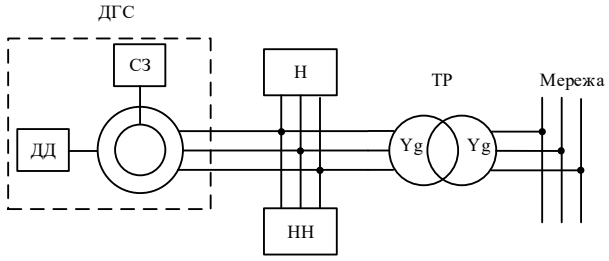

Рисунок 1. Структурна схема дизель генераторної системи під'єднаної до мережі

Симетричні складові струмів та напруг в синхронному генераторі можна розрахувати за схемою заміщення яка наведена на рис. 2. [11].

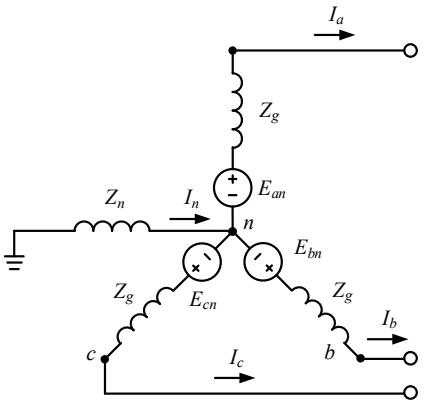

Рисунок 2. Схема заміщення синхронного генератора.

В такому випадку пряма послідовність напруги статора синхронної машини:

$$\dot{U}_{an}^{(1)} = \dot{E}_{an} - j\omega\left(L_s + M_s\right)\dot{I}_a^{(1)} = \dot{E}_{an} - Z_{g1}\dot{I}_a^{(1)}, \quad (1)$$

Зворотна послідовність напруги статора синхронної машини:

$$\dot{U}_{an}^{(2)} = -j\omega\left(L_s + M_s\right)\dot{I}_a^{(2)} = -Z_{g2}\dot{I}_a^{(2)}.. \quad (2)$$

Нульова послідовність напруги статора синхронної машини:

$$\dot{U}_{an}^{(0)} = -j\omega\left(L_s + M_s\right)\dot{I}_a^{(0)} + j3\omega M_s\dot{I}_a^{(0)} = -Z_{g0}\dot{I}_a^{(0)}. \quad (3)$$

де $Z_g = Z_{g1}$ - повний опір прямої послідовності, $Z_g = Z_{g2}$ - повний опір зворотної послідовності, $Z_g = Z_{g0}$ - повний опір нульової послідовності, $\dot{E}_{an}$ - електрорушійної сила обмотки статора, M_s - комплексна загальна взаємоіндукція кола статора, L_s - комплексна індуктивність обмоток статора, $\dot{I}_a^{(0)}$ - струм нульової послідовності, $\dot{I}_a^{(1)}$ -струм прямої послідовності, $\dot{I}_a^{(2)}$ - струм зворотної послідовності.

Несиметричні складові в трансформаторі з'єднаного зіркою із заземленою нейтралю на вищій та нижчій стороні напруги можна розрахувати за схемою заміщення [12] яка наведена на рис. 3.

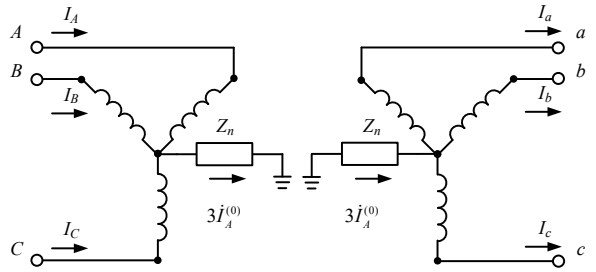

Рисунок 3. Схема заміщення трифазного трансформатора з заземленою нейтралю

Напруга, виміряна відносно землі на стороні високої напруги, складає:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}_{AN} + \dot{U}_N = \dot{U}_A^{(0)} + \dot{U}_A^{(1)} + \dot{U}_A^{(2)} = \\ &= (\dot{U}_{AN}^{(0)} + \dot{U}_{AN}^{(1)} + \dot{U}_{AN}^{(2)}) + 3Z_N\dot{I}_A^{(0)}\end{aligned}. \quad (4)$$

де $\dot{I}_A^{(0)}$ - струм фази нульової послідовності.

Для сторони низької напруги розрахунки аналогічні. Послідовності на обох сторонах трансформатора пов'язані співвідношенням:

$$\begin{aligned}&\frac{N_1}{N_2}\dot{U}_a^{(0)} = \dot{U}_A^{(0)} - 3\left[Z_N - Z_n\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\right]\dot{I}_A^{(0)}; \\ &\frac{N_1}{N_2}\dot{U}_a^{(1)} = \dot{U}_A^{(1)};\ \frac{N_1}{N_2}\dot{U}_a^{(2)} = \dot{U}_A^{(2)}.\end{aligned}. \quad (6)$$

де N_1 - кількість витків первинної обмотки, N_2 - кількість витків вторинної обмотці; Z_N - опір заземлення первинної обмотки; Z_n - опір заземлення вторинної обмотки.

Зважаючи що асинхронна машина не має нульового проводу, то нульова послідовність струму статора відсутня. Пряма та зворотна послідовності струмів статора індукують два поля, що обертаються протилежно [13].

Якщо всі швидкості взяти як частину синхронної швидкості, ковзання дорівнює *s*, а швидкість ротора дорівнює (*1-s*). Поле, що обертається індукує в роторі напруги частоти ковзання, у той час як поле, що обертається у зворотному напрямку індукує в роторі е .р. с частоти (*2-s*), помноженої на частоту живлення *f*. Кола прямої та зворотної послідовності на фазу показані на рис. 2, на якому U_{b1} і U_{b2} - це напруги прямої та зворотної послідовності фази b двигуна, яка взята як наша опорна фаза $U_{b1} = Ib1$ і Z_{m1}, $U_{b2} = I_{b2}\ Z_{m2}$, де Z_{m1} та Z_{m2} є імпедансом *I. M* до струмів прямої та зворотної послідовності

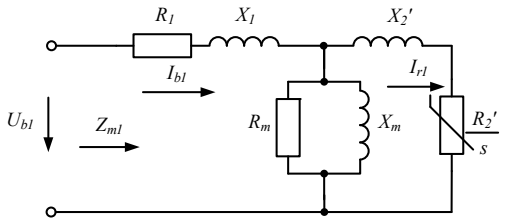

Рисунок 4. Схема заміщення асинхронного двигуна з прямою послідовністю струму

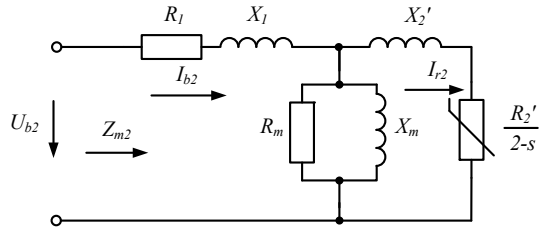

Рисунок 5. Схема заміщення асинхронного двигуна зі зворотною послідовністю струму

Результуючі струми фаз статора можна отримати шляхом накладання складових струмів прямої та зворотної послідовності в різних фазах. В роторі струми прямої та зворотної послідовності мають дві різні частоти *sf* та *2-sf* відповідно. Струми фаз ротора, відносно статора дорівнюють середньому квадратичному значенню величин віднесених струмів ротора прямої та зворотної послідовності, I_{r1} та I_{r2} відповідно. Застосовуючи метод симетричних складових [14] вирази для визначення струмів статора прямої та зворотної послідовності $\dot{I}_b^{(1)}$ та $\dot{I}_b^{(2)}$ через опори Z_a, Z_b та Z_e та лінійної напруги.

$$\dot{I}_b^{(1)}=\frac{U\left(-ja^2\sqrt{3}Z_{m2}-Z_b+aZ_c\right)+P\left(j\sqrt{3}Z_{m2}-a^2Z_a+aZ_c\right)}{-j\sqrt{3}\left[Z_{m1}\left(3Z_{m2}+Z_a+Z_b+Z_c\right)+Z_{m2}\left(Z_a+Z_b+Z_c\right)+Z_a\left(Z_b+Z_c\right)+Z_b+Z_c\right]}. \quad (7)$$

$$\dot{I}_b^{(2)}==\frac{U\left(-ja\sqrt{3}Z_{m1}+Z_b-a^2Z_c\right)-P\left(-j\sqrt{3}Z_{m1}-aZ_a+a^2Z_c\right)}{-j\sqrt{3}\left[Z_{m1}\left(3Z_{m1}+Z_a+Z_b+Z_c\right)+Z_{m2}\left(Z_a+Z_b+Z_c\right)+Z_a\left(Z_b+Z_c\right)+Z_b+Z_c\right]}. \quad (8)$$

Для дослідження розподілу несиметричних складових для схеми наведеної на рис. 1 побудовано відому модель [10] мережі з дизель-генераторною установкою та несиметричним навантаженням в програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 6). Вважатимемо, що дизельний двигун забезпечує стабільну потужність. Модель складається з наступних блоків: синхронний генератор (SM) частота 50 Гц, напруга 400 В, потужність 31,3 кВА, частота обертання 1500 об/хв. Асинхронний двигун (AM) частота 50 Гц, напруга 400 В, потужність 15 кВт, частота обертання 460 об/хв. Блок трифазного навантаження (30 W load) частота 50 Гц, напруга 400 В, потужність 30 Вт. Блок трансформатора (Transformer 10 kV / 400 MVA) напругою на первинній обмотці 10 кВ на вторинній обмотці 400 В, потужністю 60 кВА. Блок трифазного джерела живлення (10 kV 10 MVA) напругою 10 кВ, потужністю 10 МВА та частотою 50 Гц. Блок трифазного навантаження (50 kW load), частота 50 Гц, напруга 10кВ, потужність 50 кВт. Блок несиметричного навантаження (Asymmetrical load). Блок вимірювання гілки синхронної машини (Three-Phase V-I Measurement SM), блок вимірювання гілки асинхронного двигуна (Three-Phase V-I Measurement AM), блок вимірювання гілки зовнішньої мережі (Three-Phase V-I Measurement TR), вимірювальний блок (Measurement block).

На рисунку 7 наведено підсистему в якій за допомогою блоків (Sequence Analyzer) відбувається аналіз послідовностей напруги та струму на кожній гілці. Дані обробляються та зводяться до однієї таблиці (DATA).

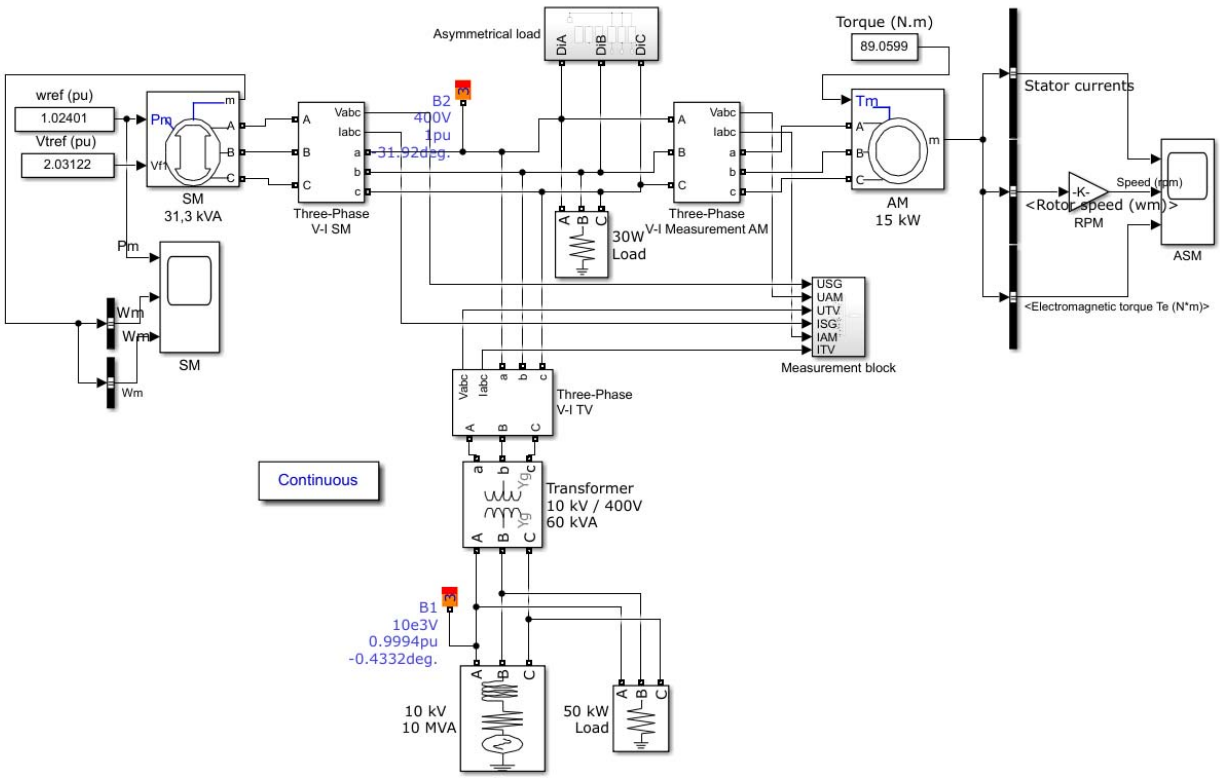

Рисунок 6. Модель мережі з дизель-генераторною установкою та несиметричним навантаженням в пакеті Simulink/Matlab

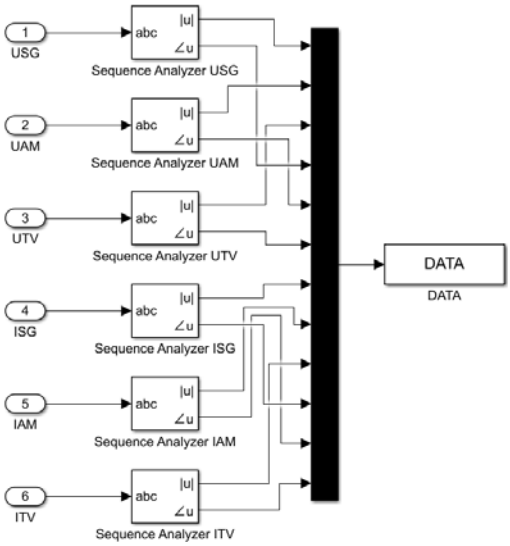

Рисунок 7. Вимірювальний блок симетричних складових

В блоці Sequence Analyzer виконується ланка операцій, в результаті чого визначаються симетричні складові. По-перше, визначення модуля та фазового зсуву відповідного електричного параметру за основною частотою (ω), наприклад для струму фази А:

$$I_{a.A} = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} i_a \sin(\omega t); \quad I_{b.A} = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} i_a \cos(\omega t); \quad (9)$$

$$I_A = \sqrt{I_{a.A}^2 + I_{b.A}^2}; \quad \psi_{I.A} = arctg\frac{I_{b.A}}{I_{a.A}},; \quad (10)$$

де i_a - миттєве значення струму фази А; $I_{a.A}$, $I_{b.A}$ - ортогональні складові струму фази А; I_A, $\psi_{I.A}$ - амплітуда та початкова фаза струму фази А. Аналогічно визначають параметри струмів та напруг інших фаз.

По-друге, з використанням оператору зсуву $a = e^{j2\pi/3}$ визначають у комплексному вигляді струми прямої $\dot{I}_1$, зворотної $\dot{I}_2$ та нульової $\dot{I}_0$ послідовностей:

$$\dot{I}_1 = 1/3\left(I_A e^{j\psi_{I.A}} a^0 + I_B e^{j\psi_{I.B}} a^1 + I_C e^{j\psi_{I.C}} a^2\right); \quad (11)$$

$$\dot{I}_2 = 1/3\left(I_A e^{j\psi_{I.A}} a^0 + I_B e^{j\psi_{I.B}} a^2 + I_C e^{j\psi_{I.C}} a^1\right); \quad (12)$$

$$\dot{I}_0 = 1/3\left(I_A e^{j\psi_{I.A}} a^0 + I_B e^{j\psi_{I.B}} a^0 + I_C e^{j\psi_{I.C}} a^0\right). \quad (13)$$

Аналогічні визначають симетричні складові напруги. Дослідження режиму роботи наведеної моделі з позиції розподілу симетричних складових струму та напруги виконано в три етапи: перший – несиметричне активне навантаження; другий – несиметричне активно-індуктивне навантаження; третій – несиметричне активно-ємнісне навантаження. На кожному етапі реалізовано ряд експериментів зі зміною повного опору фаз несиметричного навантаження. Комбінації повного опору несиметричного навантаження використані в ході експериментів зведені у таблицю 1.

Таблиця 1. Розподіл повного опору навантаження

№	Z_A, Ом	Z_B, Ом	Z_C,Ом
1	10	10	10
2	15	10	10
3	20	10	10
4	15	15	10
5	20	15	10
6	20	20	10

Забезпечення підтримки повного опору наведеного в таблиці 1 на всіх етапах виконується наступним чином. На першому етапі у разі активного навантаження повний опір дорівнює активному опору. На другому етапі, у разі активно-індуктивного навантаження, активний опір R залишається незмінним на рівні 10 Ом параметри індуктивності задаються відповідно до формули:

$$L = \frac{\sqrt{|Z|^2 - R^2}}{\omega}, \quad (14)$$

де ω - кутова частота зміни струму кола. На третьому етапі виконано дослідження з активно-ємнісним навантаженням. Як і на попередньому етапі активний опір залишається без змін, а ємність змінюється за формулою:

$$C = \frac{1}{\omega\sqrt{|Z|^2 - R^2}}, \quad (15)$$

Часові діаграми для проміжного експерименту у разі активного несиметричного навантаження наведені на рисунку 8. Результати серії експериментів для трьох етапів зведені до таблиці 2.

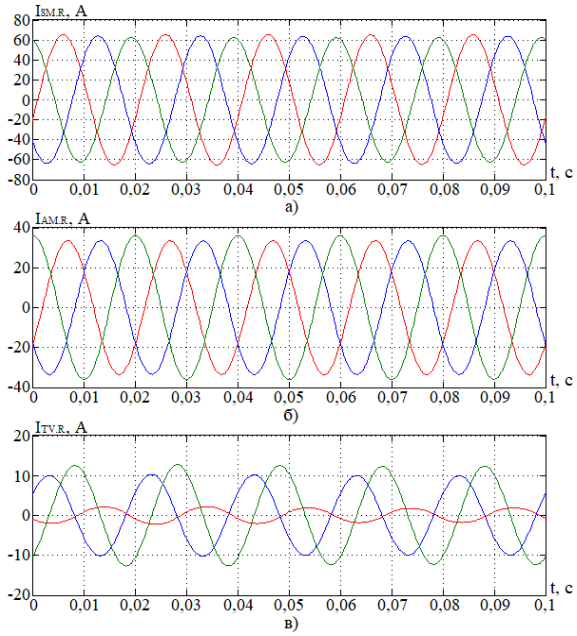

Рисунок 8. Часові діаграми струму при активному несиметричному навантаженні в гілках а) синхронного генератора; б) асинхронної машини в) зовнішньої мережі.

Таблиця 2. Зведені дані отримані в ході експериментів з різними типами навантаження

	Z_R			Z_{RL}			Z_{RC}		
№	U_{SGp}, В	U_{SGn}, В	U_{SG0}, В	U_{SGp}, В	U_{SGn}, В	U_{SG0}, В	U_{SGp}, В	U_{SGn}, В	U_{SG0}, В
1	326,86	0,11	0,00	326,86	0,11	0	326,86	0,11	0
2	326,95	0,94	2,95	322,63	2,14	6,49	331,56	2,07	6,82
3	326,97	1,48	4,44	323,17	2,41	7,52	330,96	2,41	7,9
4	327,07	1,03	2,95	318,5	2,02	6,29	336,29	1,99	6,95
5	327,09	1,29	3,92	319,03	2,55	5,68	335,69	2,56	6,16
6	327,11	1,47	4,43	319,55	2,36	7,35	335,09	2,38	8,02
№	I_{SGp}, А	I_{SGn}, А	I_{SG0}, А	I_{SGp}, А	I_{SGn}, А	I_{SG0}, А	I_{SGp}, А	I_{SGn}, А	I_{SG0}, А
1	63,79	0,03	0,00	63,79	0,03	0,00	63,79	0,03	0,00
2	63,78	1,18	0,00	64,4	2,57	0,00	63,08	2,77	0,00
3	63,76	1,77	0,00	64,34	3,01	0,00	63,16	3,21	0,00
4	63,75	1,20	0,00	65,08	2,63	0,00	62,37	2,76	0,00
5	63,75	1,57	0,00	64,99	3,33	0,00	62,46	3,55	0,00
6	63,74	1,81	0,00	64,91	3,07	0,00	62,55	3,2	0,00
№	I_{AMp}, А	I_{AMn}, А	I_{AM0}, А	I_{AMp}, А	I_{AMn}, А	I_{AM0}, А	I_{AMp}, А	I_{AMn}, А	I_{AM0}, А
1	34,34	0,01	0,00	34,34	0,01	0,00	34,34	0,01	0,00
2	34,33	1,34	0,00	34,64	2,88	0,00	34,04	3,12	0,00
3	34,34	2,02	0,00	34,58	3,38	0,00	34,08	3,62	0,00
4	34,33	1,34	0,00	34,91	2,96	0,00	33,76	3,09	0,00
5	34,32	1,77	0,00	34,88	3,74	0,00	33,8	3,98	0,00
6	34,32	2,01	0,00	34,83	3,45	0,00	33,83	3,58	0,00
№	I_{TVp}, А	I_{TVn}, А	I_{TV0}, А	I_{TVp}, А	I_{TVn}, А	I_{TV0}, А	I_{TVp}, А	I_{TVn}, А	I_{TV0}, А
1	1,82	0,01	0,00	1,82	0,01	0	1,82	0,01	0
2	2,48	1,15	3,61	6,68	2,57	7,85	7,82	2,6	8,35
3	4,16	1,72	5,43	8,09	2,96	9,17	8,66	3,02	9,67
4	5,93	1,13	3,61	15,1	2,46	7,69	15,57	2,56	8,5
5	7,73	1,47	4,80	16,34	3,12	6,94	16,51	3,31	7,54
6	9,51	1,68	5,42	17,73	2,87	9	17,75	2,97	9,82

Для покращення сприйняття чисельної інформації отриманої в таблиці 2 побудуємо діаграми зміни параметрів за серією експериментів за етапами. Зважаючи на те, що усі генеруючі елементи та елементи споживання під'єднані до одного вузла в першу чергу розглянемо складові напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей (рис. 9) в залежності від характеру несиметричного навантаження. Напруга прямої послідовності у разі зміни активного навантаження не змінює свого рівня (рис. 9. а), за умови тих же обставин у разі активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження зміна напруги має протилежний характер. У разі зростання несиметрії активно-індуктивного характеру напруга прямої послідовності знижується, а у разі активно-ємнісного збільшується. Зазначені зміни в деяких випадках перевищують 3%. Напруга зворотньої послідовності (рис. 9 б) відносно напруги прямої послідовності має невелике значення та має однаковий характер зміни. Значення напруги зворотньої послідовності досить невеликі та у разі зміни ємності чи індуктивності суттєво не відрізняються. Певним чином інша картина спостерігається у діаграмі зміни напруги нульової послідовності (рис. 9. в.), в якій суттєво відрізняється вплив характеру навантаження, активно ємнісне навантаження призводить до більшого впливу ніж активно-індуктивне. Узагальнюючи результати наведені на рис. 9 раціонально констатувати достатньо невеликий вміст несиметрії напруги у вузлі.

Розглянемо діаграми розподілу струму у гілках схеми. Діаграми струму прямої послідовності наведені на рисунку 10. Струми прямої послідовності у разі небалансу активного навантаження відрізняються незначним чином. Лише у разі прямої послідовності струму трансформатора спостерігається безперервне зростання, яке у разі активно-ємнісного, та активно індуктивного навантаження перевищує активне в середньому в 1,5 рази (рис. 10. в). Зовсім інша картина спостерігається у разі аналізу струмів машин. Характер зміни струмів обох машин в залежності від несиметрії схожий. Вплив активно-індуктивного навантаження та активно-ємнісного навантаження відрізняється суттєво та для синхронного генератора досягає 4,8% в експерименті 4, а у разі асинхронної машини складає 3,2%.

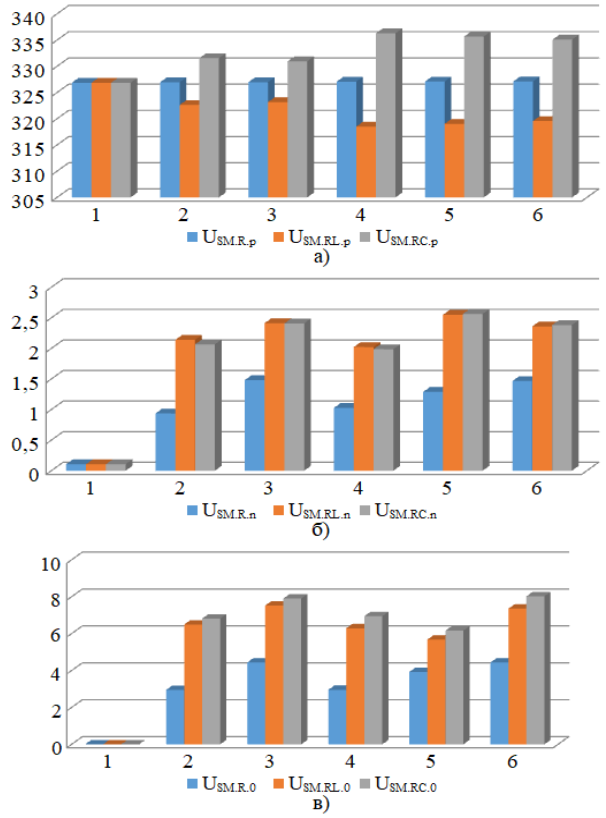

Рисунок 9. Порівняльні діаграми напруг гілки синхронного генератора між різними типами навантаження для: а) прямої послідовності; б) зворотної послідовності; в) нульової послідовності

Струми нульової послідовності, які утворені несиметричним навантаженням, повністю замикаються на трансформатор (рис. 11). Протікаючи по обмоткам трансформатора вони викликають відповідні напруги нульової послідовності (рис. 11. в.). як видно з рисунку 12 характер несиметричного навантаження суттєво впливає на значення цих струмів. Найбільша різниця спостерігається для 3 та 6 варіацій для яких відносно струму 5,43 А за умови активного навантаження, у разі активно індуктивного струм збільшується до 9,1 А, а у разі активно-ємнісного до 9,82 А. На рисунку 12 наведені діаграми розподілу струму зворотної послідовності елементів схеми. Характер розподілу струмів зворотної послідовності для усіх елементів однаковий та відповідає діаграмам розподілу зворотної послідовності напруги.

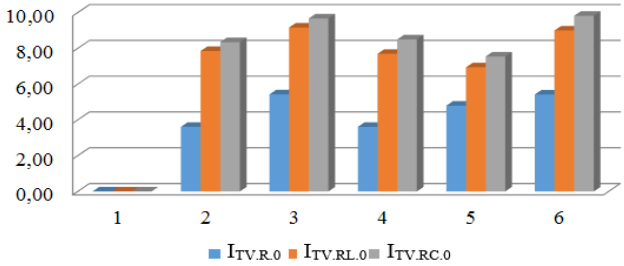

Рисунок 11. Діаграми струму нульової послідовності вторинної обмотки трансформатора за умови різних типів навантаження.

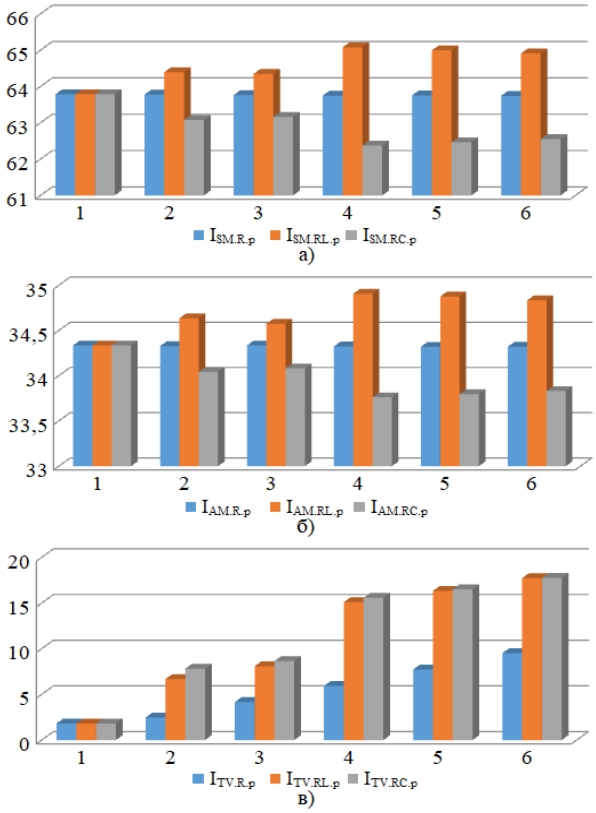

Рисунок 10. Порівняльні діаграми струмів прямих послідовностей між різними типами навантаження в гілках: а) синхронного генератора; б) синхронного двигуна; в) зовнішньої мережі

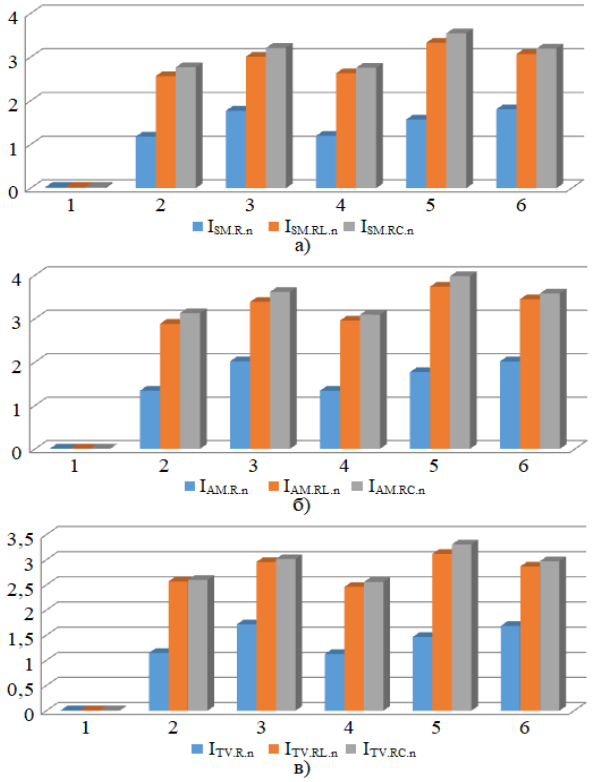

Рисунок 12. Порівняльні діаграми струмів зворотних послідовностей: а) синхронного генератора; б) асинхронного двигуна; в) зовнішньої мережі

V. ВИСНОВКИ

З використанням відомої структури побудовано модель мікромережі в якій шляхом введення несиметричного навантаження різного типу реалізовано серії експериментів з реєстрацією напруг та струмів прямої, зворотньої та нульової послідовностей в гілках мережі.

За результатами аналізу отриманих в ході дослідження даних встановлено, що напруга прямої послідовності у разі зміни активного навантаження не змінює свого рівня, за тих же обставин у разі активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження зміна напруги має протилежний характер. У разі зростання несиметрії активно-індуктивного характеру напруга прямої послідовності знижується, а у разі активно-ємнісного збільшується. Зазначені зміни в деяких випадках перевищують 3%.

Струми прямої послідовності у разі небалансу актив-ного навантаження відрізняються незначним чином. У разі прямої послідовності струму трансформатора спостерігається безперервне його зростання, яке у випадку активно-ємнісного, та активно індуктивного навантаження перевищує активне в середньому в 1,5 рази.

Струми зворотньої послідовності в досліджуваній моделі, які утворені несиметричним навантаженням, повністю замикаються на трансформатор, викликаючі напруги нульової послідовності, а характер несиметричного навантаження суттєво впливає на значення цих струмів, відмічене зростання на 61%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Олійніченко М., Бялобржеський О., Постіл А., Шокарьов Д., (2024). Аналіз факторів використання електричних джерел енергії в мікромережах з позиції системи енергоменеджменту. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит 2024, 1 (191), с. 13-32. doi: 0.20998/2313-8890.2024.01.02.

[2] Nasr-Azadani, E., Canizares, C., Olivares, Daniel Bhattacharya, Kankr. (2014). Stability Analysis of Unbalanced Distribution Systems With Synchronous Machine and DFIG Based Distributed Generators. Smart Grid, IEEE Transactions on. 5. 2326-2338. doi: 10.1109/TSG.2014.2321709..

[3] Cao, Y, Wang, H., Chen, B. (2017). Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in isolated micro-grid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 211. 012020. doi: 10.1088/1757-899X/211/1/012020.

[4] Zheng, X., Wang, C. and Pang, S. (2019). Injecting positive-sequence current virtual synchronous generator control under unbalanced grid. IET Renewable Power Generation, 13: pp. 165-170. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5047

[5] X. Wu, J. Mei, B. Wang, D. Liang, C. Qin and J. Zong. (2019). Unbalanced Loads Control Strategy for Virtual Synchronous Generator in Passive Network, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, pp. 2063-2068, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881184.,

[6] Dubey, M., A. S, Vijay,. Doolla, Suryanarayana. (2023). A Non-linear Adaptive Virtual Impedance (NLAVI) based Approach for Sharing Asymmetrical Currents. doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080721.

[7] Liu Y., Yi W., Xiaodong W. (2024). Independent Pitch Adaptive Control of Large Wind Turbines Using State Feedback and Disturbance Accommodating Control. Energies. 17, no. 18: pp. 4619. doi: 10.3390/en17184619.

[8] Pana A., Alexandru B., Florin M-M., Cristian S., Andrei J., David S., (2024). Two-Way Power Flow Balancing in Three-Phase Three-Wire Networks by Unbalanced Capacitive Shunt Compensation Applied Sciences. 14, no. 9: pp. 3746. doi: 10.3390/app14093746.

[9] Alathamneh M., Haneen G., Xingyu Y., Nelms R.,. (2022). Three-Phase Grid-Connected Inverter Power Control under Unbalanced Grid Conditions Using a Time-Domain Symmetrical Components Extraction Method. Energies 15, no. 19: pp, 6936. doi: 10.3390/en15196936

[10] Ibrahim M., (2020). Optimization of Renewable Energy-Based Smart Micro-Grid System, pp. 12, doi: 10.5772/intechopen.87093.

[11] Dufournet D., (2009). Circuit breakers go high voltage. IEEE Power Energy Magazine - IEEE POWER ENERGY MAG. 7. 34-40. doi: 10.1109/MPE.2008.930856.

[12] Stephen M., Dean B., (2018). An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation Bonneville Power Administration 35th Annual HANDS-ON Relay School March 12 - 16, 2018 Washington State University Pullman, Washington.

[13] Adekitan, A.I., Ogunjuyigbe, A., Samuel, I., (2017). The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime. Journal of Engineering Science and Technology Review. doi: 10. 136-143. 10.25103/jestr.105.17.

[14] Cociu V., Cociu L., Berzan. (2016). Symmetrical components expression of the stator current of an induction machine under internal fault, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania,, pp. 267-271, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781345.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2024

RESEARCH OF THE DISTRIBUTION SYMMETRICAL COMPONENTS IN AN ELECTRICAL SYSTEM WITH A DIESEL GENERATOR AT AN UNSYMMETRICAL LOAD

BIALOBRZHESKYI O.V. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bialobrzeski@ukr.net;

OLIYNICHENKO M.Y. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua;

VORONA V.V. magister student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: vvlaalvv@gmail.com.

YAKIMETS S.M. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ysm_seem@meta.ua

Purpose. *Investigation symmetrical components of current and voltage in microgrid elements with an autonomous synchronous generator of limited power, which works in parallel with a network transformer under the condition of non-metric load.*

Methodology. *During the research, visual programming methods were used in the Simulink/Matlab package, methods of electrical engineering theory in terms of determining symmetrical component currents and voltages in observation branches, methods of synthesizing schemes for replacing elements of electric power systems for symmetrical component currents, methods of data processing and construction diagrams using specialized software tools..*

Findings. *As a result the analysis known studies, it was established that under the condition of researching low-power generating systems in conditions of asymmetry, insufficient attention is paid to the nature of the asymmetric load. Using the well-known structure of a microgrid, which includes a synchronous generator, a machine load, and an external network transformer, its model was built, in which, by introducing asymmetric loads of various types, a series of experiments was implemented with the registration of voltages and currents of forward, reverse, and zero sequences in the branches of the network. The analysis of the results obtained during the research established that the positive sequence voltage in the case of a change in the active load does not change its level, under the same circumstances, in the case of an active-capacitive and active-inductive load, the voltage change has the opposite character. In the case of increasing asymmetry of an active-inductive nature, the positive sequence voltage decreases, and in the case of an active-capacitive one, it increases. The specified changes in some cases exceed 3%. Positive sequence currents in the case of active load imbalance differ slightly. In the case of a positive sequence current of the transformer, its continuous growth is observed, which in the case of active-capacitive and active-inductive loads exceeds the active one by an average of 1.5 times. Negative sequence currents in the studied model, which are formed by an asymmetrical load, are completely closed to the transformer, causing zero-sequence voltages, and the nature asymmetrical load significantly affects the value of these currents, a 61% increase was noted.*

Originality. *It was established that in a microgrid, which includes a synchronous generator, a machine load, a symmetrical active load of comparable power to the generator, an external network transformer, in addition to the fact of asymmetry caused by an asymmetrical load, the character of an asymmetrical load (active, active-inductive or active-capacitive).*

Practical value. *In the case of using in microgrids devices that provide an increase in the quality of electrical energy, for example, symmetrical devices, it is necessary, in addition to the asymmetry factor, to take into account the natural load that causes the latter.*

Keywords: asymmetrical load, symmetrical components, active-inductive load, active-capacitive load.

REFERENCE

[1] Olyinichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A., Shokarov D., (2024). Factors analysis use electrical energy sources in microgrids from energy management system position. Energy saving. Energy. Energy audit 2024, 1 (191), p. 13-32. doi: 0.20998/2313-8890.2024.01.02.

[2] Nasr-Azadani, E., Canizares, C., Olivares, Daniel Bhattacharya, Kankr. (2014). Stability Analysis of Unbalanced Distribution Systems With Synchronous Machine and DFIG Based Distributed Generators. Smart Grid, IEEE Transactions on. 5. 2326-2338. doi: 10.1109/TSG.2014.2321709..

[3] Cao, Y, Wang, H., Chen, B. (2017). Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in isolated micro-grid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 211. 012020. doi: 10.1088/1757-899X/211/1/012020.

[4] Zheng, X., Wang, C. and Pang, S. (2019). Injecting positive-sequence current virtual synchronous generator control under unbalanced grid. IET Renewable Power Generation, 13: pp. 165-170. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5047

[5] X. Wu, J. Mei, B. Wang, D. Liang, C. Qin and J. Zong. (2019). Unbalanced Loads Control Strategy for Virtual Synchronous Generator in Passive Network, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, pp. 2063-2068, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881184.,

[6] Dubey, M., A. S, Vijay,. Doolla, Suryanarayana. (2023). A Non-linear Adaptive Virtual Impedance (NLAVI) based Approach for Sharing Asymmetrical Currents. doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080721.

[7] Liu Y., Yi W., Xiaodong W. (2024). Independent Pitch Adaptive Control of Large Wind Turbines Using State Feedback and Disturbance Accommodating Control. Energies. 17, no. 18: pp. 4619. doi: 10.3390/en17184619.

[8] Pana A., Alexandru B., Florin M-M., Cristian S., Andrei J., David S., (2024). Two-Way Power Flow Balancing in Three-Phase Three-Wire Networks by Unbalanced Capacitive Shunt Compensation Applied Sciences. 14, no. 9: pp. 3746. doi: 10.3390/app14093746.

[9] Alathamneh M., Haneen G., Xingyu Y., Nelms R.,. (2022). Three-Phase Grid-Connected Inverter Power Control under Unbalanced Grid Conditions Using a Time-Domain Symmetrical Components Extraction Method. Energies 15, no. 19: pp, 6936. doi: 10.3390/en15196936

[10] Ibrahim M., (2020). Optimization of Renewable Energy-Based Smart Micro-Grid System, pp. 12, doi: 10.5772/intechopen.87093.

[11] Dufournet D., (2009). Circuit breakers go high voltage. IEEE Power Energy Magazine - IEEE POWER ENERGY MAG. 7. 34-40. doi: 10.1109/MPE.2008.930856.

[12] Stephen M., Dean B., (2018). An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation Bonneville Power Administration 35th Annual HANDS-ON Relay School March 12 - 16, 2018 Washington State University Pullman, Washington.

[13] Adekitan, A.I., Ogunjuyigbe, A., Samuel, I., (2017). The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime. Journal of Engineering Science and Technology Review. doi: 10. 136-143. 10.25103/jestr.105.17.

[14] Cociu V., Cociu L., Berzan. (2016). Symmetrical components expression of the stator current of an induction machine under internal fault, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania,, pp. 267-271, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781345.