

УДК 621.31

ОБМІННІ ПРОЦЕСИ В ТРИФАЗНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, Д.С. Горенко, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
вул. Борщагівська, 115/3, Київ, 03056, Україна
e-mail: gorenko.darya@yandex.ua

Проведено аналіз підходів до визначення реактивної потужності. Наведено переваги визначення реактивної потужності за допомогою аналізу обмінних процесів. Розглянуто та проаналізовано методики визначення параметрів у трифазних мережах. Узагальнено аналітичні залежності між основними параметрами трифазної мережі різної структури (три- та чотирипровідної). Проведено порівняльний аналіз обмінних процесів у перетині кола трифазної мережі по кожній фазі окремо та в системі в цілому. Побудовано відповідні залежності між відхиленням обмінної потужності та навантаженням для несиметричного режиму в трифазній трипровідній мережі. Бібл. 15, рис. 8, таблиця.

Ключові слова: трифазні мережі, обмінні процеси, реактивний струм, несиметричні режими, електромагнітна сумісність.

Вступ. Постійне збільшення навантаження на мережі централізованого електропостачання призводить до їх перенавантаження, частих аварій, економічних втрат, що виникають внаслідок погіршення якості електроенергії, а також до перебоїв в електропостачанні. Тому до концепції розосередженої генерації входить використання відновлюваних джерел електроенергії [12, 13]. Зазвичай потужність таких систем складає до 100 кВт. Система може бути як однофазною, так і трифазною. Уніфікація елементів і спрощення процесу проектування дає змогу зменшити питомі показники вартості автономних систем. Не останню роль відіграє можливість поступового нарощування потужності та покращення системи електропостачання [10–15].

Підвищення якості електроенергії, ефективності її передачі, перетворення та споживання вимагає детального аналізу та оптимізації енергетичних процесів і електромагнітної сумісності [1, 5, 9]. Дослідження безперервно-дискретного перетворення енергетичних процесів у автономних системах електроживлення вимагає створення математичних моделей, відповідних методів аналізу енергетичних процесів та оцінки різних сторін їх протікання, підведення балансу складових електроенергії, керування енергетичними процесами. Часто поширення поняття реактивної потужності та методів її визначення, що використовувалися для синусоїдальних процесів, на несинусоїдальні призводить до втрати зв'язку з фізикою процесів у колах та до труднощів при інтерпретації результатів [11, 13–15].

Реактивна потужність, визначена за класичною теорією, дає змогу: лише виявити наявність взаємокомпенсації реактивних потужностей різних гармонік (можливість існування умови рівності нулю реактивної характеристики при $i_p(t) \neq 0$; встановити наявність реактивної потужності у колі з нелінійним нестационарним опором при відсутності реактивних елементів; проводити відображення генерації реактивної потужності в колах з ключовими елементами; виявляти гармонічні $p_\Gamma(t)$ та міжгармонічні $p_{M\Gamma}(t)$ складові миттєвої потужності $p(t)$ [4, 6, 14]. Використання обмінної потужності $Q_{об}$ дає змогу: однозначного відображення обмінних процесів (індикація умови $W \neq 0$); накопичення енергії в реактивних елементах (характеристика енергоємності та екстремальних режимів роботи реактивних елементів); відображення енергообміну при наявності різнойменних гармонік струму та напруги в перетині кола; відображення обмінних процесів між генераторами струму та напруги; оцінки обмінних процесів у перехідних режимах; співставлення обмінних процесів у різних перетинах кола; оцінки взаємного впливу елементів кола, які характеризуються різним гармонічним складом напруги $u(t)$ та струму $i(t)$; оцінки стійкості режимів роботи за рахунок введення граничних

значень величини характеристик; врахування значень кутів струму ψ_k^i та напруги ψ_k^u ($k > 1$) для вищих гармонік; однозначного усунення зворотних потоків енергії при компенсації відповідної характеристики [1, 2, 6, 10].

Мета та завдання. Метою цього дослідження є аналіз кількісних та якісних характеристик, інтенсивності протікання обмінних процесів у трифазних системах з невизначеними вихідними параметрами. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити зв'язки між основними параметрами трифазних три- та чотирипроводних мереж електроживлення;
- за відомими законами основ електротехніки визначити пофазово обмінну та загальну обмінну потужності через визначений перетин;
- провести аналіз отриманих результатів та зробити відповідні висновки.

Матеріали та результати дослідження. Так, для систем з несинусоїдальними сигналами, поряд з реактивною потужністю Фризе Q_F (міра квадратичної нев'язки між повною та активною потужностями), використовують реактивну потужність Кваде (реактивна потужність визначається як квадратична нев'язка між реактивною потужністю Фризе та основною гармонічною складовою реактивної потужності), що є нев'язкою між неактивною потужністю Фризе та першою гармонічною складовою реактивної потужності [4, 6]: $Q_{KB} = \sqrt{Q_F^2 - Q_1^2}$, де Q_1 – реактивна потужність першої гармоніки.

Прикладом реактивної потужності, визначеної за допомогою обмінних процесів, є реактивна потужність на основі визначення обмінної потужності Q_{OB} за умови постійної інтенсивності перетворення електроенергії в інші види протягом періоду T [6].

З виразу обмінної потужності можна отримати

$$Q_{OB} = U_{m(1)} I_{m(1)} \left(\int_{T/2}^{T/3} \sin \omega t \sin(3\omega t / 2) dt + \int_{T/2}^{2T/3} \sin \omega t \sin(3\omega t / 2) dt \right) \approx 0,221 U_{m(1)} I_{m(1)}.$$

Реактивна потужність Q дорівнює $Q = \pi Q_{OB} \approx 0,692 U_{m(1)} I_{m(1)}$.

Для визначення реактивної обмінної потужності можна використати розкладання струму $i(t)$ на дві складові: активну $i_a(t)$ та реактивну $i_p(t)$. Тоді з врахуванням виразів $i_a(t) = u(t)P/U_D^2$, $i_p(t) = i(t) - i_a(t)$ обмінна реактивна потужність визначається таким чином:

$$Q_{OB,p} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} |u(t) i_p(t)| dt. \quad (1)$$

При роботі автономних систем електроживлення як в острівному режимі, так і паралельно з мережею виникає низка проблем, а саме:

- взаємний вплив різнотипних генераторів та їх вплив на навантаження як на лінійне та нелінійне представлено на рис. 1;
- вплив зовнішніх завод різного характеру, форми та тривалості на генератор електроенергії, варіант якого показано на рис. 2;
- вплив різних гармонічних складових частоти сигналів та різних завод на обмінні процеси наведено на рис. 3;
- можливість виявлення рекуперації електроенергії в мережу залежно від періоду показано на рис. 4.

З рис. 4 видно, що на певних інтервалах потужність, яка проходить через контур, додатна, а в інші інтервали – від'ємна. Саме знак обмінної потужності визначає режим споживання чи генерації (рекуперації) з боку навантаження сигналів. У випадку несинусоїдальних сигналів існує можливість виявляти та компенсувати завади, що здійснюють шкідливий вплив на генератор як з боку навантаження, так і з боку інших генераторів системи.

Такі процеси проаналізовані в однофазних мережах і не викликають питань. Проте при аналізі трифазних мереж такої однозначності немає, і це потребує більш поглибленого аналізу.

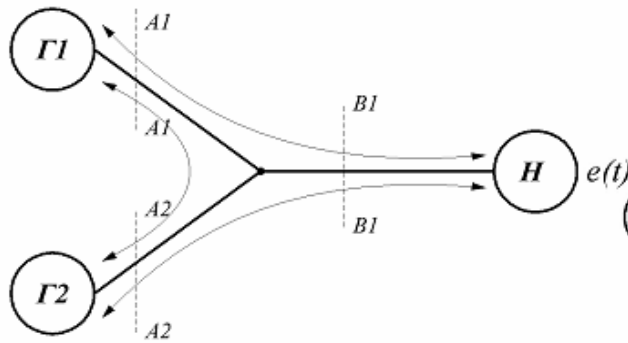


Рис. 1

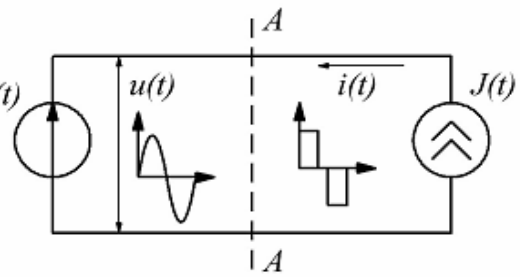


Рис. 2

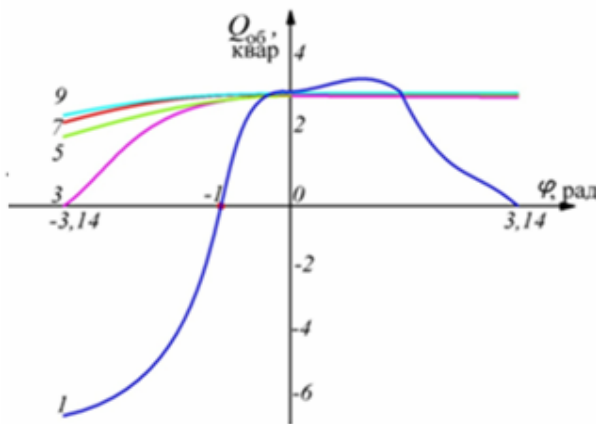


Рис. 3

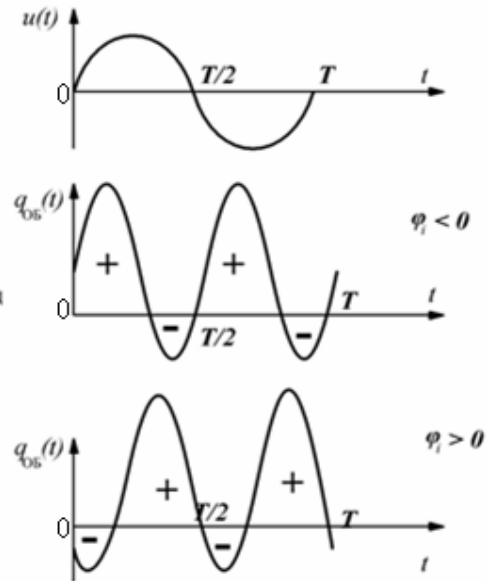


Рис. 4

Обмінні процеси в однофазних системах розглянуто з різних боків, визначено фактори, які впливають на обмінну потужність, зумовлюючи її наявність або рівність нулю. Проаналізовано вплив різнотипних сигналів та вищих гармонічних складових на однофазні системи з урахуванням обмінних процесів.

Деякі автори миттєву потужність трьох фаз лінії визначають за формулою [4, 7–9] $p(t) = e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)$.

Несиметрію трифазних систем прийнято оцінювати за допомогою двох показників: коефіцієнта несиметрії за напругою зворотної послідовності k_{2U} ; коефіцієнта несиметрії за напругою нульової послідовності k_{0U} . Ці коефіцієнти визначаються методом симетричних складових, за яким несиметрична система розкладається на три симетричні з прямою, зворотною та нульовою послідовністю фаз. Проте використання цього методу є обмеженим, наприклад, при несинусоїдальному характері генератора, перехідних режимах у мережі, нелінійності навантаження. Тому важливо адекватно оцінити процеси, які протікають у трифазних мережах та розробити алгоритм їх аналізу. При несиметричному режимі роботи трифазної мережі необхідно враховувати симетруючу напругу $u_{mn}(t)$, яка зазвичай враховується при визначенні струмів, але не враховується при визначенні потужності. Тому в рамках роботи було виведено формулу миттєвої потужності і, спираючись на неї, виконано подальші дослідження: $p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t) - u_{mn}(t)(i_a(t) + i_b(t) + i_c(t))$.

При аналізі трифазних автономних систем електроживлення не завжди вдається адекватно і точно визначити початкові параметри для розрахунку активної потужності. Інколи неможливо виміряти деякі з них. Тому взаємозв'язок між ними наведено в таблиці, де представлено зведені формули, виходячи з початкових параметрів для трифазних як трипровідних (рис. 5), так і чотирипровідних (рис. 6) мереж для різних варіантів заданих початкових умов:

- 1) задані множини початкових струмів та навантаження $\{i(t)\}$, $\{Z\}$; необхідно визначити множини $\{u(t)\}$, $\{p(t)\}$;
- 2) задані множини початкових напруг та струмів $\{u(t)\}$, $\{i(t)\}$; необхідно визначити множини $\{Z\}$, $\{p(t)\}$;
- 3) задані множини початкових напруг та навантаження $\{u(t)\}$, $\{Z\}$; необхідно визначити множини $\{i(t)\}$, $\{p(t)\}$.

Трифазна трипровідна система (рис. 5)	Трифазна чотирипровідна система (рис. 6)
1) $\{i(t)\}, \{Z\} \Rightarrow \{u(t)\}, \{p(t)\}$	
$u_{12}(t) = i_1(t)Z_1 - i_2(t)Z_2;$ $u_{23}(t) = i_2(t)Z_2 - i_3(t)Z_3;$ $u_{31}(t) = i_3(t)Z_3 - i_1(t)Z_1.$	$u_1(t) = i_1(t)Z_1 - i_n(t)Z_n;$ $u_2(t) = i_2(t)Z_2 - i_n(t)Z_n;$ $u_3(t) = i_3(t)Z_3 - i_n(t)Z_n.$
$p(t) = i_1^2(t)Z_1 + i_2^2(t)Z_2 + i_3^2(t)Z_3.$	$p(t) = i_1^2(t)Z_1 + i_2^2(t)Z_2 + i_3^2(t)Z_3.$
2) $\{u(t)\}, \{i(t)\} \Rightarrow \{Z\}, \{p(t)\}$	
$Z_1 = \frac{u_{12}(t) + u_{23}(t) + u_{31}(t)}{2i_1};$ $Z_2 = \frac{u_{12}(t) + u_{23}(t) + u_{31}(t)}{2i_2};$ $Z_3 = \frac{u_{12}(t) + u_{23}(t) + u_{31}(t)}{2i_3}.$	$Z_1 = \frac{3u_1(t) - u_2(t) - u_3(t)}{4i_1};$ $Z_2 = \frac{-u_1(t) + 3u_2(t) - u_3(t)}{4i_2};$ $Z_3 = \frac{-u_1(t) - u_2(t) + 3u_3(t)}{4i_3}.$
$p(t) = \frac{(u_{12}(t) + u_{23}(t) + u_{31}(t))}{2} \times$ $\times \frac{(i_1(t) + i_2(t) + i_3(t))}{2}.$	$p(t) = \frac{i_1(3u_1(t) - u_2(t) - u_3(t))}{4} +$ $+ \frac{i_2(-u_1(t) + 3u_2(t) - u_3(t))}{4} +$ $+ \frac{i_3(-u_1(t) - u_2(t) + 3u_3(t))}{4}.$
3) $\{u(t)\}, \{Z\} \Rightarrow \{i(t)\}, \{p(t)\}$	
$i_1(t) = \frac{u_{12}(t)Z_3 - u_{31}(t)Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3};$ $i_2(t) = \frac{u_{23}(t)Z_1 - u_{12}(t)Z_3}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3};$ $i_3(t) = \frac{u_{31}(t)Z_2 - u_{23}(t)Z_1}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}.$	$i_1(t) = \frac{(u_1(t) - u_2(t))Z_3Z_n + 3}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n} +$ $+ \frac{(u_1(t) - u_3(t))Z_2Z_n - u_1Z_2Z_3}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n};$ $i_2(t) = \frac{(u_2(t) - u_1(t))Z_3Z_n}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n} +$ $+ \frac{(u_2(t) - u_3(t))Z_1Z_n - u_2Z_1Z_3}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n};$ $i_3(t) = \frac{(u_3(t) - u_1(t))Z_2Z_n}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n} +$ $+ \frac{(u_3(t) - u_2(t))Z_1Z_n - u_3Z_1Z_2}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n}.$
$p(t) = \frac{(u_{12}Z_3)^2(Z_1 + Z_2) + (u_{31}Z_2)^2(Z_1 + Z_3)}{(Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3)^2}$ $+ \frac{(u_{23}Z_1)^2(Z_2 + Z_3) - 2Z_1Z_2Z_3(u_{12}(t)u_{31}(t))}{(Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3)^2}$ $+ \frac{u_{12}(t)u_{23}(t) + u_{31}(t)u_{23}(t)}{(Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3)^2}.$	$p(t) =$ $= \left(\frac{(u_1(t) - u_2(t))Z_3Z_n + (u_1(t) - u_3(t))Z_2Z_n - u_1Z_2Z_3}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n} \right)^2$ $+ \left(\frac{(u_2(t) - u_1(t))Z_3Z_n + (u_2(t) - u_3(t))Z_1Z_n - u_2Z_1Z_3}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n} \right)^2$ $+ \left(\frac{(u_3(t) - u_1(t))Z_2Z_n + (u_3(t) - u_2(t))Z_1Z_n - u_3Z_1Z_2}{Z_1Z_2Z_3 + Z_1Z_2Z_n + Z_1Z_3Z_n + Z_2Z_3Z_n} \right)^2$

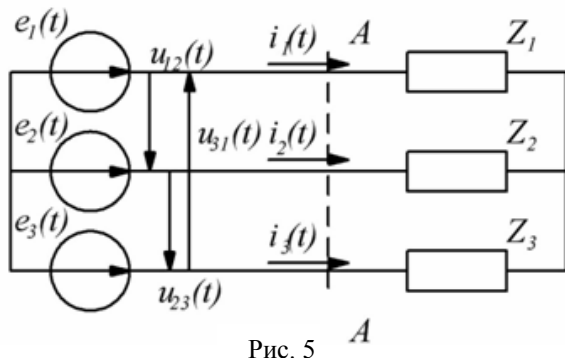


Рис. 5

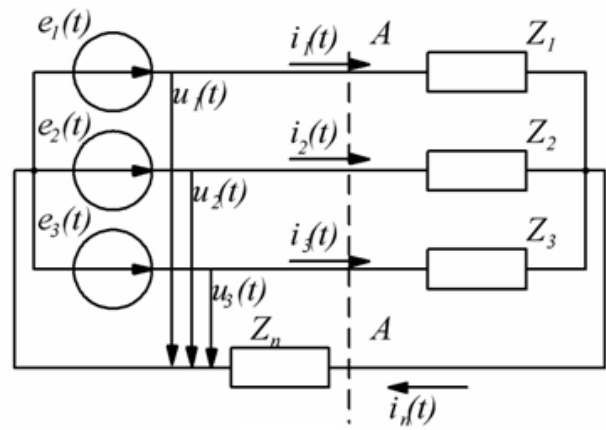


Рис. 6

Аналіз обмінних процесів у трифазних мережах розглянуто на прикладі трипровідної мережі. Задамося вихідними даними:

– лінійна напруга

$$u_{12}(t) = U_{12} \sin(\omega t); \quad u_{23}(t) = U_{23} \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad u_{31}(t) = U_{23} \sin(\omega t + 2\pi/3);$$

– навантаження

$$Z_1 = R_1 + jX_1; \quad Z_2 = R_2 + jX_2; \quad Z_3 = R_3 + jX_3.$$

Знаючи навантаження та лінійну напругу, немає проблеми визначити фазну напругу:

$$u_1(t) = \frac{\frac{u_{12}(t)}{Z_2} - \frac{u_{31}(t)}{Z_3}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}}; \quad u_2(t) = \frac{\frac{u_{23}(t)}{Z_3} - \frac{u_{12}(t)}{Z_1}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}}; \quad u_3(t) = \frac{\frac{u_{31}(t)}{Z_1} - \frac{u_{12}(t)}{Z_2}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}}.$$

За формулами, наведеними в таблиці, визначаються струми, що протікатимуть у кожній фазі як при симетричному, так і несиметричному режимах:

$$i_1(t) = \frac{u_{12}(t)Z_3 - u_{31}(t)Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}; \quad i_2(t) = \frac{u_{23}(t)Z_1 - u_{12}(t)Z_3}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}; \quad i_3(t) = \frac{u_{31}(t)Z_2 - u_{23}(t)Z_1}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}.$$

За формулою (1) розраховується обмінна потужність у кожній фазі та визначається їх

сума: $\Sigma Q_{\text{Об}} = Q_{\text{Об1}} + Q_{\text{Об2}} + Q_{\text{Об3}}$, де $Q_{\text{Об}i} = \frac{1}{2T} \int_0^T u_i(t) i_{pi}(t) dt$ – обмінна потужність i -ї фази ($i =$

$= [1, \dots, 3]$); $u_i(t)$ – фазна напруга i -ї фази; $i_{pi}(t) = i_i(t) - i_{ai}(t)$ – реактивна складова струму i -ї фази;

$i_{ai}(t) = u_i(t) P_i / U_{Di}^2$, – активна складова струму i -ї фази; $U_{Di} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i(t)^2 dt}$ – діюче значення на-

пруги в i -й фазі; $P_i = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t) i_i(t) dt$ – активна потужність i -ї фази.

Визначимо загальний струм через перетин. Для цього проведемо еквівалентування трифазної схеми, показаної на рис. 5, та перетворимо її спочатку в схему, зображену на рис. 7 а, при цьому не зсуваючи перетин. За формулами еквівалентування визначається електрорушійна сила об'єднаного джерела $e_1(t)$ та $e_2(t)$. Також визначається еквівалентне навантаження $Z_{1,2}$:

$$e_{1,2}(t) = \frac{\frac{e_1(t)}{Z_1} + \frac{e_2(t)}{Z_2}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}; \quad (2)$$

$$Z_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}. \quad (3)$$

Аналогічно перетворюється схема, зображена на рис. 7 а, в схему, зображену на рис. 7 б, та визначаються загальна електрорушійна сила і загальне навантаження:

$$e_{\text{екв}}(t) = e_{1,2}(t) - e_3(t); Z_{\text{екв}} = Z_{1,2} + Z_3.$$

Для схеми, зображеної на рис. 7 б, за законом Ома визначаються загальний струм (4)

та його активна (5) і реактивна (6) складові:

$$i_{\text{екв}} = \frac{e_{\text{екв}}(t)}{Z_{\text{екв}}}; \quad (4)$$

$$i_a(t) = e_{\text{екв}}(t)P / U_D^2; \quad (5)$$

$$i_p(t) = i(t) - i_a(t). \quad (6)$$

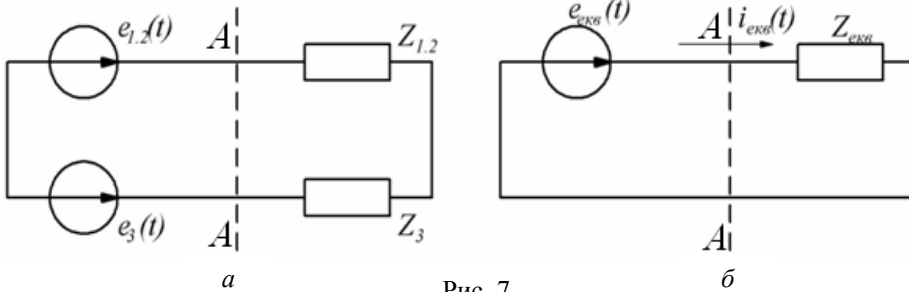


Рис. 7

За формулою (1), аналогічно як для

кожної фази окремо, визначається загальна обмінна потужність через перетин кола:

$$Q_{\text{об}\Sigma} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} e_{\text{екв}}(t) i_p(t) dt.$$

Для симетричного та несиметричного режимів роботи при проведених розрахунках виявилася така тенденція:

$$Q_{\text{об}\Sigma} \leq \Sigma Q_{\text{об}}. \quad (7)$$

Для більш наочного представлення нерівності (7) проведемо аналітичний розрахунок та побудуємо графік зміни відхилення $\Delta Q_{\text{об}}$ від навантаження у відносних одиницях:

$$\Delta Q_{\text{об}} = \frac{(\Sigma Q_{\text{об}} - Q_{\text{об}\Sigma})}{\Sigma Q_{\text{об}}}. \quad (8)$$

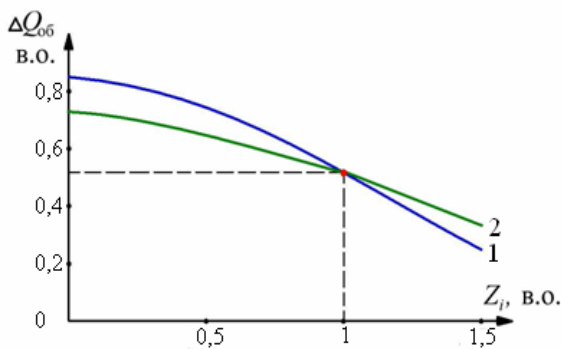


Рис. 8

Відповідно до розрахункових даних побудуємо графічну залежність відхилення обмінної потужності $\Delta Q_{\text{об}}$ від навантаження (рис. 8). Крива 1 показує залежність величини $\Delta Q_{\text{об}}$ при зміні активної складової активно-індуктивного навантаження, а крива 2 відображає залежність величини $\Delta Q_{\text{об}}$ при зміні індуктивної складової активно-індуктивного навантаження. Для проведення розрахунків та аналізу використовувалися програмне забезпечення Microsoft Excel та MathCAD.

Висновки. Уточнено складові потоку миттєвої потужності трифазних три- та чотирипровідних автономних мереж електроживлення, що дало змогу більш адекватно, детально та наочно оцінити процеси у трифазних системах. Здійснено макромодельовання трифазного генератора напруги та несиметричного навантаження.

Виявлено невідповідність між загальною обмінною та сумарною обмінною потужностями кожної фази, що пояснюється електромагнітною взаємодією. Наведено функціональні залежності відхилення обмінної потужності від активної та індуктивної складових навантаження. Найбільше відхилення обмінної потужності при менших значеннях опору.

Отримані результати дають можливість оцінити взаємний вплив різнотипних генераторів та їх вплив на навантаження як на лінійне та нелінійне, проаналізувати вплив зовнішніх заводів різного характеру, форми та тривалості на генератори електроенергії, охарактеризувати вплив різних гармонічних складових частоти сигналів і різних заводів на обмінні, продіагностувати процеси рекуперації електроенергії в мережу для покращення якісних характеристик електроенергії на всіх етапах її протікання.

1. Денисюк С.П., Базюк Т.М., Дерев'янюк Д.Г. Оцінка ефективності сумісної роботи розосереджених джерел генерації електроенергії, включаючи відновлювальні, в електроенергетичних системах // Вісник Кременчуцького нац. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2013. – № 3 (80). – С. 54–59.
2. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Щербань К.Ю. Особливості аналізу впливу завад від різномірних типів джерел розосередженої генерації на процеси в навантажених // Журнал инженерных наук. – 2014. – № 2. – С. В1–В7.
3. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. и др. Электромагнитная совместимость потребителей. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
4. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Потужність втрат і реактивна потужність у трифазних системах електропостачання при симетричних синусоїдних напругах джерела // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Спец. вып., Т.2. – 2014. – 9 (128). – С. 70–81.
5. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 63–65.
6. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 264 с.
7. Родькин Д.И. О несоответствии некоторых положений теории энергопроцессов теореме Теллеждена // Проблемы автоматизированного электропривода. – С. 71–79.
8. Родькин Д.И. Расширение возможностей применения теоремы Теллеждена в электротехнических задачах // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. Вип. 4. – 2010. – (63). – С. 98–109.
9. Сапунов М.Л., Худяков А.А. К вопросу оценки несимметрии трехфазных систем // Пермский государственный технический университет. – С. 241–242.
10. Denysiuk S., Horenko D. Analysis Of Exchangeable Processes During Parallel Operation Of Wind Power Plants // Eastem-European Journal of Enterprice Technologies – 2016. – 4/8(82). – С. 26–32.
11. Коепке G. Electromagnetic Compatibility and Smart Grid Interoperability Issues // SGIP Document. – 2012. – № 5. – С. 118.
12. Nobrega V.F., Oliveira M.A.P., Corrêa M.B.R. and Vitorino M.A. Control technique to solve the imbalance problem in Photovoltaic Grid Connected Power Systems. – 2014. – 2. – С. 5494–5500.
13. Ramie J. Smart grid EMC standards harmonization // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2010.
14. Staniulis R. Reactive Power Valuation // TEIE-5150. – 2001. – С. 1–42.
15. Verma S.P., Kumar P., Noor-ul-Islam Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility // MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering. – 2012. – № 1. – С. 55–64.

УДК 621.31

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, **Д.С. Горенко**, асп.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», ул. Борщаговская, 115/3, Киев, 03056, Украина

Обменные процессы в трехфазных автономных системах электроснабжения

Проведен анализ подходов к определению реактивной мощности. Приведены преимущества определения реактивной мощности посредством анализа обменных процессов. Рассмотрены и проанализированы методики определения параметров в трехфазных сетях. Обобщены аналитические зависимости между основными параметрами трехфазной сети различной структуры (трех- и четырехпроводной). Проведен сравнительный анализ обменных процессов в пересечении круга трехфазной сети по каждой фазе отдельно и в системе в целом. Построены соответствующие зависимости между отклонением обменной мощности и нагрузкой для несимметричного режима трехфазной трехпроводной сети. Библ. 15, рис. 8, таблица.

Ключевые слова: трехфазные сети, обменные процессы, реактивный ток, несимметричные режимы, электромагнитная совместимость.

S.P. Denysiuk, D.S. Horenko

National technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Borschagovskaya str., 115/3, 03056, Kiev, Ukraine

Exchangeable processes in the three-phase autonomous power supply systems

The analysis of approaches to the definition of reactive power. The advantages of the definition of reactive power through the analysis of metabolic processes. Reviewed and analyzed the methodology for determining parameters in three-phase networks. Generalized analytical dependences between the main parameters of the three-phase network with different structures (three-wire and four-wire). Comparative analysis of exchangeable processes in the intersection of a circle three-phase network for each phase separately and the system as a whole. The appropriate relationship between the deviation of exchangeable capacity and load for unbalanced mode three-phase three-wire network. References 15, figures 8, table.

Key words: three-phase network, the exchange processes, reactive current, unbalanced modes, electromagnetic compatibility.

Надійшла 07.11.2016

Received 07.11.2016