УДК 621.314.22 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2020.04.060

КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ МІСТ В УМОВАХ СЛАБКОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ГРАФІКІВ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ

П.П. Говоров[1*], докт. техн. наук, **В.О. Новський**[2**], докт. техн. наук, **В.П. Говоров**[1], канд. техн. наук, **А.К. Кіндінова**[1]

[1] **Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова**
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61000, Україна, e-mail: philip.govorov@gmail.com

[2] **Інститут електродинаміки Національної академії наук України**
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: novsky@ied.org.ua

Наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень фільтрокомпенсуючого пристрою для застосування в освітлювальних електричних мережах та вольтододавального трансформатора, первинні обмотки якого підключаються до різних фаз електричної мережі, задля керування потоками активної й реактивної потужностей за слабкої кореляції графіків напруги і реактивної потужності та комплексному розв'язаному веденні режимів за напругою і реактивною потужністю в міських розподільних мережах. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: вольтододавальний трансформатор, фільтрокомпенсуючий пристрій, реактивна потужність, міська електромережа, керування, режим.

Вступ. У сучасних умовах розвитку суспільства особливу роль набувають питання, пов'язані з економним витрачанням паливних та енергетичних ресурсів. Це вимагає, насамперед, застосування енергоефективних технологій передачі та розподілу енергії, чим забезпечується зниження її втрат в мережах та витрат у споживачів. Тому вирішення питання підвищення енергоефективності складають на сьогодні основу більшості програм як державного, так і регіонального рівнів. Зокрема важливе значення має стан енергоефективності розподільних електричних мереж міст, в яких споживається понад 40% виробленої електричної енергії та для яких найбільш важливим є висока якість ведення режимів при розподілу електроенергії. Натомість, керування режимами розподільних мереж міст, які є останньою ланкою в постачанні електричної енергії до споживачів, здійснюється сьогодні переважно в ручному дискретному режимі без врахування розподілу обладнання на значній території, а процесів – у часі. Наслідками такого стану є низька ефективність роботи мереж та підключених до них споживачів, що супроводжується високим рівнем втрат потужності в мережах і значними витратами електричної енергії при її споживанні. Втрати потужності в розподільних електричних мережах міст України доходять сьогодні до 22%, а її витрати у споживачів у 4 – 6 разів більші, ніж це має місце в розвинених країнах світу. Тому розвиток методів і технічних засобів керування режимами роботи розподільних електричних мереж міст є актуальною та важливою науково-практичною задачею.

Метою роботи є аналіз можливостей застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв в освітлювальних електричних мережах, а також вольтододавальних трансформаторів, первинні обмотки яких підключаються до різних фаз електричної мережі для керування потоками активної та реактивної потужностей та їхніх складових в умовах слабкої кореляції графіків напруги і реактивної потужності та, внаслідок цього, зменшення втрат потужності в міських розподільних мережах.

Матеріали дослідження. Як свідчать результати досліджень, керування режимами міських електромереж за умов використання традиційних засобів комплексного вирішення питань регулювання напруги та компенсації реактивної потужності шляхом застосування косинусних конденсаторних батарей не може вирішити питання у зв'язку із забезпеченням лише їхнього пов'язаного керування [1]. Крім того, наявність у мережі електроприймачів з нелінійними характеристиками обумовлює перетікання потужності спотворень. Це вимагає задля її компенсації інших методів та технічних засобів. Дослідження спектральних характеристик електроприймачів показали високу ступінь спотворення форми кривої струму, що споживається ними з розподільної мережі та сягає 30-40%. Це робить необхідним врахування рівня спотворень у разі оцінювання режимів роботи розподільних електричних мереж з нелінійними навантаженнями. Задля розроблення технічних засобів компенсації реактивної потужності, наприклад, керованих фільтрокомпенсуючих пристроїв

© Говоров П.П., Новський В.О., Говоров В.П., Кіндінова А.К., 2020
ORCID ID: *https://orcid.org/0000-0002-0379-1448; ** https://orcid.org/0000-0003-3857-7027

(ФКП) в зазначених мережах з нелінійними електроприймачами проведено розрахунок параметрів і режимів електричних мереж з урахуванням гармонічного складу кривих напруги і струму мережі. У цьому випадку опис параметрів режиму можна представити у наступному вигляді з урахуванням деяких відомих виразів, а також результатів досліджень фізичних процесів у розрядних лампах [2-4]:

$$i = \sum_{\nu=1}^{\infty} I_m \sin\left(\nu\omega t + \varphi_\nu + \varphi_{\nu\,\text{фкп}}\right); \qquad P = \sum_{\nu=1}^{\infty} U_\nu I_\nu \cos\varphi_\nu;$$

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}\ ;\ Q = \sqrt{Q_{з\Sigma}^2 + T^2}\ ;\ Q_{з\Sigma} = Q_з + Q_і;\quad \cos\varphi = P/S,$$

де i, P, Q, cosφ – значення параметрів режиму мережі; I_m, φ_ν – відповідно амплітудне значення і фазовий зсув ν-ої гармоніки струму мережі; $\varphi_{\nu\text{фкп}}$ – фазовий зсув ν-ої гармоніки струму фільтрокомпенсуючого пристрою; U_ν, I_ν – діючі значення ν-ої гармоніки напруги та струму, T – реактивна потужність спотворень; S – повна потужність; $Q_{з\Sigma}$ – результуюча реактивна потужність зсуву; $Q_з$ – реактивна потужність зсуву вузла навантаження; $Q_і$ – інерційна реактивна потужність, яка характерна тільки для освітлювальних електричних мереж з розрядними лампами, що обумовлено природою газового розряду в них (тобто інерційністю носіїв заряду, яка пов'язана з «кінетичною динамічною індуктивністю» лампи).

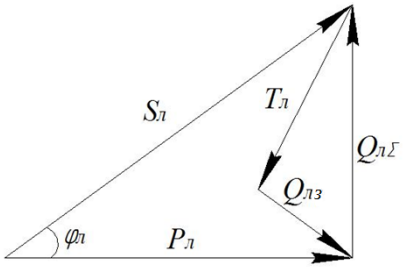


Рис. 1

На рис.1 показано векторну діаграму реактивних потужностей в міській мережі з навантаженням у вигляді розрядних ламп, яка враховує розподіл сумарної реактивної потужності освітлювальної електричної мережі на складові $Q_{ЛЗ}$ та спотворень $T_Л$. Для оцінки доцільності застосування ФКП запропоновано поняття коефіцієнта потужності спотворень $K_T = T^2/Q^2$ і коефіцієнта потужності зсуву $K_Q = Q_{зΣ}^2 / Q^2$, а також критерій доцільності застосування ФКП у вигляді нерівності $K_T \geq 5\%$.

Чисельні розрахунки параметрів режиму міських електроосвітлювальних мереж із застосуванням розрядних ламп, наприклад, типу «ДНаТ–150» потужністю $P_л$ 150 Вт дали змогу отримати наступні дані: $I_Л$ =2,30А, $S_Л$ =250,9 ВА, $P_Л$ =203,8Вт, cosφ$_Л$=0,81, $Q_Л$ =145,23 ВАр, $T_л$=125,13 ВАр ,$Q_{лз}$ = 75,74 ВАр, $Q_{л\,і}$= 46,62ВАр, $K_{Tл}$=0,73, $K_{Qл}$=0,27.

Результати розрахунків узгоджуються з експериментальними даними, згідно з якими отримано: $I_л$ = 2,35 А, $S_л$=251,45 ВА, $P_л$=200 Вт, cosφ$_л$ = 0,8, $Q_л$=146 ВАр.

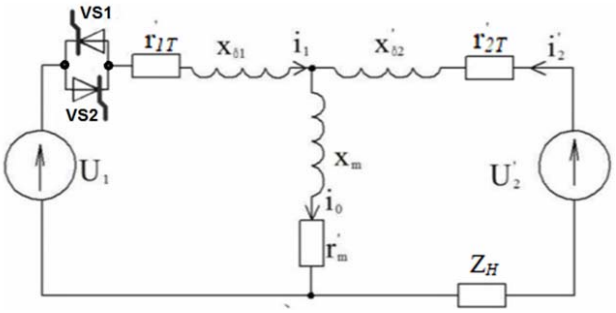
Аналіз результатів розрахунків свідчить про необхідність відокремленої компенсації реактивних потужностей спотворення T та зсуву $Q_З$ в електричних мережах з нелінійними споживачами. Останнє вимагає застосування задля компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах з нелінійним навантаженням, окрім шунтових конденсаторів, що здійснюють компенсацію лише реактивної потужності зсуву $Q_З$, додатково фільтрокомпенсуючих пристроїв, призначення яких – компенсація реактивної потужності спотворень T. За цих умов лише незначна величина реактивної потужності зсуву $Q_З$ компенсується конденсаторними батареями, а більша ж її частина мусить бути скомпенсована за допомогою саме ФКП.

Дослідження і розроблення засобів керування режимами у розподільних мережах показали можливість ефективного застосування окрім ФКП також фазокерованих вольтододавальних трансформаторів (ВДТ), первинні обмотки яких підключаються до різних фаз електричної мережі, шляхом відповідного керування напівпровідниковими ключами змінного струму, циклоконверторів на основі фазорегуляторів, а також керованих фазоповоротних авто- та трансформаторів [5-9]. Визначено особливості роботи такого ВДТ в різних режимах та умови його надійної роботи у складі розподільних електричних мереж міст, зокрема, на основі проведеного аналізу схем зазначеного ВДТ і електромагнітних процесів в мережі з ним виявлено можливість насичення магнітної системи трансформатора та зсуву ЕРС і струмів в обмотках ВДТ.

Встановлено, що робота ВДТ з тиристорним перемиканням у поєднанні з найбільш поширеним часо-імпульсним способом управління та природною комутацією одноопераційних тиристорів характеризується наявністю ряду особливостей, пов'язаних із зміною величини та тривалості протікання струмів в обмотках, в залежності від режимів роботи і параметрів кіл первинної та вторинної обмоток трансформатора. Якщо тривалість протікання струму I_1 в його первинній обмотці перевищує кут π, то за кутів керування тиристорів $\alpha < \pi - \beta$, де β – кут увімкненого стану тиристора ключа,

подання керуючої напруги, за якою він включається, відбудеться в момент часу, коли напруга на тиристорі дорівнює нулю або має зворотну полярність.

Умови надійної роботи ВДТ з тиристорами в колі первинної обмотки ВДТ можна записати у вигляді: $\alpha > \pi - \beta + \gamma$, де γ – «кут утримання» тиристора. У цьому випадку його «кут включення» $\alpha = \pi - \beta + \gamma$ визначено, як критичний ($\alpha_{кр}$). У разі зменшення кута включення тиристора до величини $\alpha < \alpha_{кр}$ або збільшення тривалості протікання струму β в колі первинної обмотки до величини $\beta > \pi + \alpha - \gamma$ трансформатор ВДТ переходить в один з аварійних режимів роботи: «дросельний» або «одностороннього підмагнічування».



Для дослідження процесів в електричних мережах з ВДТ розроблено заступну схему (рис. 2), яка враховує визначені особливості. З урахуванням викладеного, процеси в ВДТ описуються системою рівнянь

$$\begin{aligned} U_1 &= i_1 r_{1П} + L_{\sigma 1П}\frac{di_1}{dt} + L_M\frac{di_0}{dt}, \\ U_2^{'} &= i_2^{'} r_{2П}^{'} + L_M\frac{di_0}{dt} + L_{\sigma 2П}\frac{di_2}{dt}, \\ i_0 &= i_1 + i_2^{'}, \end{aligned} \qquad (1)$$

де $r_{1П} = r_{1T} + r_T$; $r_{2П} = r_{2T} + r_н$; $L_{σ1П}$, $L_{σ2П}$ – індуктивність розсіювання обмоток ВДТ; r_{1T}, r_{2T}, r_T, $r_н$ – активні опори обмоток трансформатору, тиристорів та навантаження; U_1 – вхідна напруга; $U_2^{'}$ – приведена вихідна напруга; $x_m = \omega L_м$ – індуктивний опір намагнічування; $x_{σ1} = \omega L_{σ1П}$, $x_{σ2} = \omega L_{σ2П}$, $x_н = \omega L_н$ – індуктивні опори розсіювання обмоток та навантаження ВДТ (на рис. 2 також позначено: $Z_Н$ – повний опір навантаження; *VS*1-*VS*2 – одноопераційні тиристори).

Для оцінювання впливу режимів роботи та параметрів ВДТ на значення кута включення тиристорів α в квазіусталених режимах достатнім є окреме рішення системи рівнянь (1)

$$I_1 = \frac{[\pm U_1(R_н^{'2} + x_m^2) + U_2^{'}x_m^2 + U_2^{'}R_н^{'}x_m]}{(R_н^{'}x_m^2 - x_m^2 r_{1П} + R_н^{'2}r_{1П}^{'}) + (R_н^{'2}x_m + x_{σ1}x_m^2 + R_н^{'2}x_{σ1})}. \qquad (2)$$

Значення критичного кута $\alpha_{кр}$, за яким можлива надійна робота ВДТ і мережі його живлення, визначається за умов перетворення Т-подібної заступної схеми ВДТ (рис. 2) на П-подібну та еквівалентних перетворень отриманих опорів та напруг у вигляді

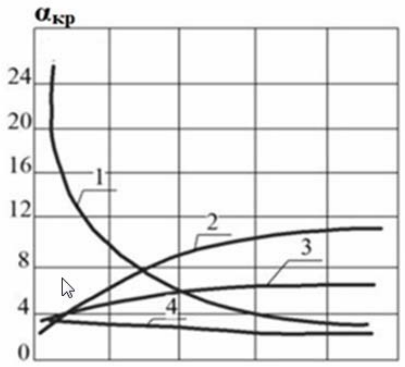
$$\alpha_{кр} = \text{arctg}\left(\frac{U_2^{'}R_н^{'}x_m(R_н^{'}x_m^2 - x_m^2 r_{1П} + R_н^{'2}r_{1П}) - [\pm U_1(R_н^{'}r_{1П}) + U_2^{'}x_m^2]\cdot(R_н^{'2}x_m + x_{σ1}x_m^2 + R_н^{'2}x_{σ1})}{[\pm U_1(R_н^{'}r_{1П}) + U_2^{'}x_m^2]\cdot(R_н^{'}x_m^2 - x_m^2 r_{1П} + R_н^{'2}r_{1П}) + U_2^{'}R_н^{'}x_m(R_н^{'2}x_m + x_{σ1}x_m^2 + R_н^{'2}x_{σ1})}\right), \qquad (3)$$

де $R_н^{'} = (r_{2T}^{'} + r_н)\cdot(W_1/W_2)^2$; W_1, W_2 – число витків обмоток ВДТ; «±» свідчить про «узгоджене» або «зустрічне» підключення обмоток ВДТ, а еквівалентні параметри елементів П-подібній заступної схеми ВДТ визначаться наступним чином:

$$U_e = \frac{U_2^{'}\cdot x_m^2}{R_н^{'2} + x_m^2};\ Z_e = \frac{R_н^{'}\cdot x_m}{R_н^{'} + x_m} = \frac{R_н^{'}\cdot x_m^2 + R_н^{'2}\cdot x_m}{R_н^{'2} + x_m^2}.$$

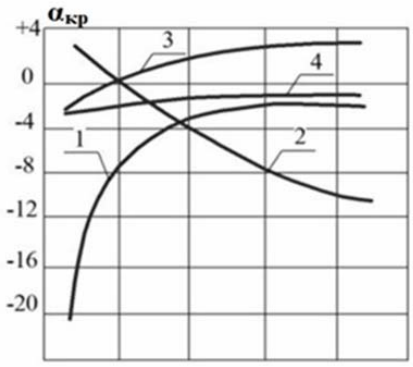
Графічні залежності $\alpha_{кр} = f(x_m, R_н, x_{σ1}, r_{1П})$ в ел. град., що отримані в результаті розрахунку за формулою (3), показано на рис. 3 (*а* – «узгоджене», *б* – «зустрічне» включення обмоток ВДТ) для чотирьох кривих *1 – 4* при позначенні осі абсцис відповідно: x_m; R_H; $x_{σ1}$; $r_{1П}$.

Отримані результати досліджень свідчать про те, що для забезпечення умов надійної та економічної роботи таких ВДТ в квазіусталених та перехідних режимах необхідним є керування тиристорами одночасно за струмом та напругою на тиристорах. Крім того, вони показали принципову можливість керування режимами активної та реактивної потужності за допомогою ВДТ з фазами, що перемикаються, та можливість використання ВДТ і ФКП в розподільних електричних мережах міст в як активний елемент інтелектуальних систем електропостачання, що функціонують на основі концепції *Smart Grid*.



0	100	200	300	400	x_m, Ом
0	10	20	30	40	R_H, Ом
0	0,1	0,2	0,3	0,4	$x_{\sigma 1}$, Ом
0	1	2	3	4	$r_{1П}$, Ом

а



0	100	200	300	400	x_m, Ом
0	10	20	30	40	R_H, Ом
0	0,1	0,2	0,3	0,4	$x_{\sigma 1}$, Ом
0	1	2	3	4	$r_{1П}$, Ом

б

Рис. 3

Задля виявлення загальних закономірностей функціонування ВДТ у складі розподільних мереж припущено, що до вузла мережі підключено групу з трьох однофазних ВДТ, а їхнє живлення по первинній обмотці здійснюється від трифазного симетричного джерела напруги.

У розглянутих умовах розподільну електричну мережу з ВДТ представлено у вигляді трифазної системи напруг і струмів різних частот та послідовностей p=0,1,2 (нульова, пряма та зворотна відповідно).

З урахуванням живлення вторинної обмотки ВДТ від джерела струму у разі підключення до нього ФКП та освітлювального навантаження, вираз для визначення миттєвого значення струму, що споживається, у k-ї фазі має наступний вигляд:

$$i_{ck} = \left\{ Z_{\text{Н}kv}^{-1} \left\{ U_{mk} \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}] + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{2} E_{2kvm} \sin\left[v\omega t + \psi_{E2kv} - \psi_{\text{ФКП}kv} - \frac{\pi n_{\text{Т}}}{6} - (k-1)\frac{2\pi}{3} \right] \cdot \right.\right.$$
$$\left.\left. \cdot \dot{S}_{kpv} \left(1 + \frac{W_{2k}}{W_{1k}} e^{j\pi n_{\text{Т}}/6} \right) \right\} + \sum_{v=0}^{\infty} I_{0mkv} \sin(v\omega t + \psi_{10kv} - \frac{\pi n_{\text{Т}}}{6}) \right\} \frac{W_{2k}}{W_{1k}} e^{j\pi n_{\text{Т}}/6}, \quad (4)$$

де i_{ck} – споживаний струм k-ї фази первинній обмотки ВДТ; ψ_{E2kv}, $\psi_{\text{ФКП}kv}$, ψ_{I0kv} – фазові зсуви v-ї гармоніки E_2 (ЕРС вторинній обмотки ВДТ), ФКП і струму намагнічування I_0; I_{0mkv} – максимальне значення струму I_0; $Z_{\text{Н}kv}$ –опір навантаження для v-ї гармоніки k-ї фази; $n_{\text{Т}}$ – група з'єднання обмоток ВДТ; $\dot{S}_{kpv}$ – матриця одиничних ортів k-ї фази p-ї послідовності v-ї гармоніки; W_{1k} і W_{2k} – кількість витків первинної та вторинної обмоток ВДТ для k-ї фази мережі.

Для врахування техніко-економічних наслідків протікання струмів вищих гармонік в міських розподільних мережах розроблено математичну модель ефективності їхнього функціонування, яка базується на багатокритеріальній оцінці режимів мережі з урахуванням критеріїв ефективності у вигляді

$$F(\bar{Z}) = \sum_{i=1}^{n} f_i(\bar{Z})\gamma_i \quad (5)$$

де $F(\bar{Z})$ – узагальнений критерій ефективності; μ_i – ваговий коефіцієнт ефективності по i-му критерію; f_i – критеріальна функція ефективності; $\bar{Z} = \{Z_1, Z_2, \ldots Z_n\} \in D \subseteq R^n$ – вектор параметрів, що заданий на множині D, яка належить простору параметрів R^n.

Оптимізаційна задача «$max\ F(\bar{Z})$» за наявності обмежень на параметри вирішено методом Айере, що дозволило визначити оптимальні параметри деяких електротехнічних пристроїв, які виготовлено на підприємствах: ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА» (м. Тернопіль) – установча серія групових регуляторів напруги 0,38/0,22 кВ потужністю 16 – 63 кВт для освітлювального обладнання і ДП «ХЕМЗ» (м. Харків) – установча серія багатофункціональних пристроїв потужністю 63 – 160 кВт для компенсації реактивної потужності та регулювання напруги 0,38/0,22 кВ у міських електромережах. Відмінною особливістю розробленої моделі є врахування рівня вищих гармонік у складі вектору параметрів *Zj* та значення втрат напруги і потужності в мережах та їхнього впливу на техніко-економічні показники роботи мереж у вигляді зміни рівня електроспоживання та комфорту споживачів електроенергії. В моделі враховано також значення відносного коефіцієнту спотворення напруги $K^* = K_T / K_{\text{ном}}$ та відносні втрати потужності $\Delta P^* = \Delta P / \Delta P_{\text{ном}}$. За результатами досліджень роботи ВДТ у складі розподільних електричних мереж встановлено можливість забезпечення фазового зсуву струму первинної обмотці ВДТ для першої гармоніки в залежності від його параметрів (група з'єднання обмоток n_T і коефіцієнт трансформації K_T) та мережі. Результати розрахунків свідчать про те, що зі зміною числа витків W_{1k} і W_{2k} та групи n_T змінюється модуль та фаза струму i_{1k} у первинній обмотці ВДТ і струму, який споживається з мережі, що підтверджує практичне використання зазначених ВДТ для управління потоками активної та реактивної потужностей в міських розподільних мережах, а також рекуперації частини потужності з навантажувальної мережі в живильну. На рис. 4 наведено графічні залежності $\psi_{i1k}=f(n_T)$, отримані шляхом розрахунків за (4), де позначено: *1* – за K_T=10; *2* – за K_T=5; *3* – за K_T=4; *4* – за K_T=3. Результати аналізу свідчать, що за n_T=1-5 має місце відстаючий зсув струму i_{ck}, а за n_T = 7-11 – випереджаючий, причому за n_T =10-12 і n_T =1-3 відбувається збільшення модуля споживаного з мережі струму, а за n_T = 4-5 і n_T = 7-8 – його зменшення.

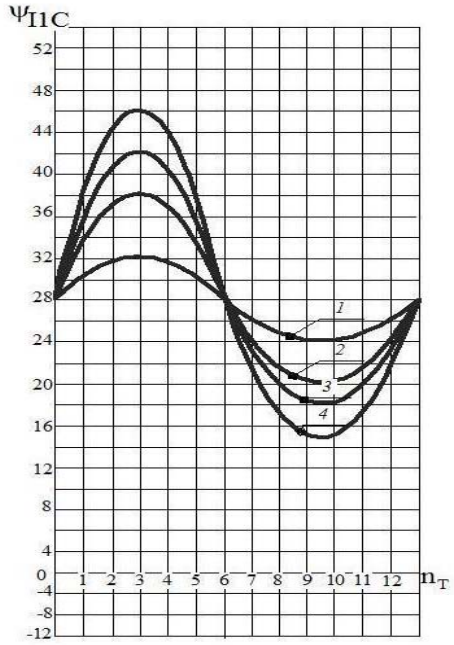
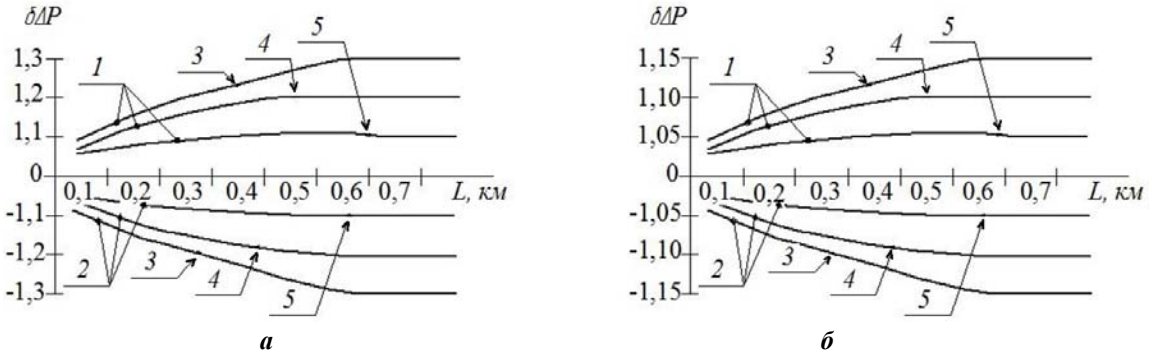


Рис.4

На рис. 5 показано графічні залежності, яки від ображають результати розрахунку відносної зміни втрат потужності в мережах $\delta\Delta P$ до та після встановлення ВДТ на ділянці діючої електромережі АТ«Харківобленерго» фідеру довжиною *L* для різних значень коефіцієнтів потужності навантаження $\cos\varphi_н$, трансформації K_T та групи n_T з'єднання обмоток ВДТ, а саме – на рис. 5, *а*: *1* – n_T = 9; *2* – n_T = 3; *3* – $\cos\varphi_н$ = 0,86; *4* – $\cos\varphi_н$ = 0,94; *5* – $\cos\varphi_н$ = 0,98, а на рис. 5, *б*: *1* – n_T =7; *2* – n_T = 5; *3* – $\cos\varphi_н$ = 0,86; *4* – $\cos\varphi_н$ = 0,94; *5* – $\cos\varphi_н$ = 0,98.



а ***б***

Рис. 5

Отримані результати свідчать про значне зниження втрат потужності у навантажувальному вузлі мережі, до якого підключений зазначений ВДТ.

Висновки.

1. Показано, що для компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з нелінійним навантаженням окрім шунтуючих конденсаторних батарей, що здійснюють компенсацію лише реактивної потужності зсуву, додатково необхідно застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв задля компенсації реактивної потужності спотворень, зокрема, в міських освітлювальних мережах з розрядними лампами.

2. Розрахунки, виконані для різних груп з'єднання обмоток ВДТ, первинні обмотки яких підключаються до різних фаз електричної мережі, показали, що шляхом зміни числа витків і групи з'єднання їхніх обмоток можна цілеспрямовано регулювати значення модуля та фази струму в первинних обмотках ВДТ, що сприяє їхньому ефективному застосуванню як активних елементів міських інтелектуальних мереж.

3. Аналіз отриманих даних свідчить про доцільність використання зазначених ВДТ для керування потоками активної і реактивної потужностей та їхніх складових, рекуперації частини потужності з навантажувальної мережі в живильну в умовах нелінійності характеристик їхніх споживачів та низької кореляції графіків напруги і реактивної потужності та за рахунок цього добитися значного зменшення втрат потужності у розподільних мережах.

1. Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Терешин О.В., Четверикова И.М. Комплексное решение вопросов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях. *Технічна електродинаміка.* 2009. Тем. вип. «*Силова електроніка та енергоефективність*». Ч.1. С. 47-50.

2. Крогерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э. П., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. Рига: Физ.-энерг. Ин-т Латв. АН, 1993, 294 с.

3. Артеменко М.Ю., Батрак Л.М., Поліщук С.Й. Активний струм та повна потужність трифазних систем електроживлення. *Технічна електродинаміка.* 2018. № 6. С. 69-72.
DOI: https://doi.org/10.15407/techned2018.06.069

4. Govorov P.P., Govorov V.P., Korol O.V. Reactive power compensation in electrical circuits whit discharge lamps. *Proceeding International Scientific Conference* (UNITECH-14). Gabrovo, 21-22 November, 2014. Vol. 1. Pp. 59-65.

5. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. К.: Наш формат, 2013. 378 с.

6. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Особливості реалізації функції перетворення трансформаторно-ключової виконавчої структури регулятора-стабілізатора напруги змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 35–39. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2017.02.035

7. Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V., The model and characteristics of circular phase convertor. 10th International Conference and Exhibition on *Electromechanical and Power Systems. Culegere de articole* (SIELMEN-2015). 6-8 octombrie, 2015. Pp. 180-184.

8. Калинин Л., Зайцев Д., Тиршу М., Голуб І. Моделирование циклоконвертора на базе фазорегулятора с круговым преобразованием. IV міжнародна конференція *Інтелектуалькі енергетичні системи – ESS'15*. Київ, 9-12 червня, 2015. С. 317-321.

9. Kalinin L, Zaitsev D, Tirshu M., Golub I. Capabilities for improving the control strategy of direct frequency conversion by using the phase-shifting transformer with power electronic switching equipment. International conference *Energy of Moldova* – 2016. *Regional aspects of development*. Chisinau, Republic of Moldova, 29 September–01 October, 2016. Pp. 214-221.

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ ГОРОДОВ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ГРАФИКОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ

Ф.П. Говоров[1], докт. техн. наук, **В.А. Новський**[2], докт.техн.наук, **В.Ф. Говоров**[1], канд. техн. наук, **А.К. Киндинова**[1]

[1] **Харьковский Национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,**
ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61000, Украина, **e-mail: philip.govorov@gmail.com**

[2] **Институт электродинамики НАН Украины,**
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, **e-mail: novsky@ied.org.ua**

Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований фильтрокомпенсирующего устройства для применения в осветительных электрических сетях и вольтодобавочного трансформатора, первичные обмотки которого подключаются к различным фазам электрической сети для управления потоками активной

и реактивной мощностей в условиях слабой корреляции графиков напряжения и реактивной мощности и комплексном решении ведения режимов по напряжению и реактивной мощности в городских распределительных сетях. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, фильтрокомпенсирующее устройство, реактивная мощность, городская электрическая сеть, управление, режим.

MANAGEMENT OF MODES OF DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORKS OF CITIES UNDER CONDITIONS OF WEAK CORRELATION OF GRAPHICS OF ACTIVE AND REACTIVE POWER

P.P. Govorov[1], V.O. Novskiy[2], V.P. Govorov[1], A.K. Kindinova[1]
[1] O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy,
Marshala Bazhanova str., 17, Kharkiv, 61000,Ukraine, e-mail: philip.govorov@gmail.com
[2] Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057,Ukraine, e-mail: novsky@ied.org.ua

Settlement and experimental studies of the use of filter-compensating devices for use in lighting electrical networks and phase-switched booster transformers for controlling the flows of active and reactive powers are presented. The analysis of component capacities in the conditions of non-linearity of the characteristics of their consumers and low correlation of voltage and reactive power in urban distribution networks is carried out. References 9, Figures 5.

Keywords: phase-switched booster transformers, filter-compensating devices, reactive power, urban distribution networks, control, mode.

1. Hovorov F.P., Hovorov V.F., Teroshyn O.V., Chetverykova Y.M. A comprehensive solution to voltage regulation and reactive power compensation in lighting electrical networks. *Tekhnichna elektrodynamika.* Tematycnyi vypusk "*Sylova elektronika ta energoefektyvnist*". 2009. No1. Pp. 47-50. (Rus).
2. Kroherys A.F., Rashevyts K.K., Treimanys E P., Shynka Ya.K. AC power. Ryha: Fyziko-energeticheskii institute Latviiskoi akademii nauk, 1993. 294 p. (Rus).
3. Artemenko M.Iu., Batrak L.M., Polishchuk S.I. Active current and apparent power of three-phase power systems. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2018. No 6. Pp. 69-72. (Ukr). DOI: https://doi.org/10.15407/techned2018.06.069
4. Govorov P.P., Govorov V.P., Korol O.V. Reactive power compensation in electrical circuits whit discharge lamps. *Proceeding International Scientific Conference* (UNITECH-14). Gabrovo, 21-22 November, 2014. Vol. 1. Pp. 59-65.
5. Shydlovskyi A.K., Novskyi V.O., Zharkin A.F. Stabilization of electrical parameters in three-phase systems by semiconductor corrective devices. Kyiv: Nash format, 2013. 378 p. (Ukr).
6. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi A.H. Features of realization of function of transformation of the transformer-key executive structure of the regulator-stabilizer of alternating current. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2017. No 2. Pp. 35-39. (Ukr). DOI: https://doi.org/10.15407/techned2017.02.035
7. Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V., The model and characteristics of circular phase convertor. 10thInternational Conference and Exhibition on *Electromechanical and Power Systems. Culegere de articole* (SIELMEN-2015). 6-8 octombrie. 2015. Pp.180-184.
8. Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Golub I. Modeling a cyclo-converter based on a phase shifter with circular conversion. IV International Conference *Intelligent Energy Systems ESS'15*. Kyiv, 9-12 June, 2015. Pp. 317-321. (Rus).
9. Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Golub I. Capabilities for improving the control strategy of direct frequency conversion by using the phase-shifting transformer with power electronic switching equipment. International conference E*nergy of Moldova – 2016. Regional aspects of development*. Chisinau, Republic of Moldova, 29 September – 01 October, 2016. Pp.214-221.

Надійшла 28.02.2020
Остаточний варіант 08.04.2020