

УДК 621.316.722.1

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.066>

КОРИГУВАННЯ ЯКОСТІ СТРУМУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ТИРИСТОРНИМ РЕГУЛЯТОРОМ ЗМІННОЇ НАПРУГИ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

О.І. Чиженко*, докт. техн. наук, **І.В. Блінов****, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ 03057, Україна

e-mail: alivchizh@ukr.net, blinovigor81@gmail.com

Розглянуто застосування способу регулювання змінної напруги, за якого покращення якості струму мережі живлення досягається дискретним змінням індуктивності в колі протікання цього струму для трифазного регулятора змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні, реалізованого за схемою з зустрічно-паралельними тиристорами та нульовим проводом. Побудовано залежності коефіцієнтів гармонік та спотворення струму мережі від значення напруги, що регулюється, які доводять ефективність застосування запропонованого способу в цьому регуляторі. Визначено необхідну кількість секцій реактора та належну індуктивність їхніх обмоток для забезпечення під час регулювання напруги глибиною 50 % на активно-індуктивному навантаженні значень коефіцієнта гармонік, які не перевищують 7 %. Бібл. 9, рис. 3, табл.

Ключові слова: регулятор змінної напруги, спосіб регулювання, якість струму мережі, індуктивний реактор, секція обмотки реактора, відпайка обмотки

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичної галузі України спрямовані зокрема на підвищення ефективності електропостачання споживачів, забезпечення стандартів якості електричної енергії, яка їм надається. На сьогодні вимоги до якості електричної енергії встановлено в кодексах системи передачі та розподілу [1, 2], вони мають враховуватись у практичній діяльності оператора системи передачі та операторів систем розподілу [3]. Водночас важливим напрямом науково-практичних досліджень є підвищення якості електричної енергії для потреб споживачів, зокрема і таких, що використовують технології виробництва, які потребують плавного регулювання змінної напруги під навантаженням безконтактним способом [4]. Прикладом такої технології може слугувати електрографітація (зрощування монокристалів напівпровідникових матеріалів). Це завдання ефективно вирішується за допомогою тиристорного регулятора змінної напруги (РЗН) за схемою із зустрічно-паралельно увімкненими вентилями, плавне регулювання напруги в яких здійснюється зміною фази кута управління тиристорами. Трифазні модифікації цього регулятора досліджувалися в роботах [5]. Суттєвим недоліком такого РЗН є те, що в процесі регулювання напруги він генерує в мережу живлення вищі гармоніки струму [5, 6], які погіршують якість електроенергії, що передається мережею, тим самим погіршуючи електромагнітну сумісність мережі з встановленими в ній споживачами енергії. Для вирішення цієї актуальної для вітчизняних електричних мереж проблеми було запропоновано спосіб регулювання напруги, захищеного патентом України [9], який полягає в тому, що індуктивний реактор у РЗН виконується секційним, а відпайки обмотки, що відповідають цим секціям, переключуються [8, 9] у процесі регулювання напруги за спеціальним алгоритмом, за якого індуктивність реактора L_p змінюється у такий спосіб, що забезпечується належна якість вхідного струму РЗН, який в таких РЗН також є струмом мережі. Застосування цього способу регулювання для випадку активного навантаження в однофазному мостовому РЗН було проілюстровано в роботі [7]. У роботі [8] була показана реалізація цього способу в трифазному РЗН за схемою із зустрічно-паралельними вентилями під час регулювання змінної напруги на активному навантаженні.

Метою статті є обґрунтування ефективності запропонованого [9] способу коригування якості струму мережі під час регулювання напруги на активно-індуктивному навантаженні РЗН за схемою із зустрічно-паралельними вентилями і нульовим проводом.

Схема об'єкта дослідження, в якій застосовується запропонований спосіб [9], приведена на рис. 1, де: A, B, C – фазні клеми РЗН, до яких приєднується трифазна напруга мережі живлення; 0 – клема нульового проводу; L_n і r_n – відповідно індуктивність і активний опір фази навантаження; $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n$ – n тиристорні групи із зустрічно-паралельними ввімкнутими тиристорами, які в кожній фазі перемикають відпайки обмотки індуктивного реактора L_p , змінюючи його індуктивність (позначимо її так само L_p), та здійснюють регулювання фазної напруги U_n на $r_n - L_n$ навантаженні через змінення фази імпульсів їхнього управління, тобто змінення кута управління α ; T_0 – тиристорна група, яка від'єднує в РЗН індуктивний реактор L_p і здійснює регулювання напруги U_n , коли його немає.

Якість струму мережі характеризується коефіцієнтами спотворення $v = I_{(1)}/I$ та гармонік $K_\Gamma = \sqrt{I^2 - I_{(1)}^2} / I_{(1)}$, де I і $I_{(1)}$ – відповідно діючі значення фазного струму мережі i (він же фазний струм навантаження) та його першої гармоніки $i_{(1)}$. Коефіцієнт гармонік частіше вираховують у відсотках, тобто $K_\Gamma\% = \left(\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2} / I_{(1)}\right) \cdot 100\%$. Вираз для фазного струму i знаходимо з рівняння за другим законом Кірхгофа, складеним для півперіоду напруги живлення u для контуру: фаза A – нульовий провід (для інших фаз із урахуванням відповідного зсуву фазних напруг – аналогічні рівняння)

$$u = x_p \frac{di}{d\vartheta} + r_n i + x_n \frac{di}{d\vartheta}, \quad (1)$$

де $u = U_m \sin \vartheta = \sqrt{2}U \sin \vartheta$; $\vartheta = \omega t$, $\omega = 2\pi f$; $x_p = \omega L_p$; $x_n = \omega L_n$; t – поточна часова змінна, f – частота мережі живлення, $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \pi$ – інтервал, на якому справедливе рівняння (1), на практиці цей інтервал скорочується до інтервалу $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \lambda$, де λ – кут, який визначає довжину відкритого стану тиристора, у разі коли $\vartheta = \alpha + \lambda$ цей вентиль природно закривається.

Із рівняння (1) знаходимо співвідношення для струму i – за очевидної початкової умови $i(\alpha) = 0$ маємо

$$i = \frac{\sqrt{2}U}{z_\Sigma} \left[-\sin(\alpha - \varphi_\Sigma) e^{\frac{\vartheta - \alpha}{\mu_\Sigma}} + \sin(\vartheta - \varphi_\Sigma) \right], \quad (2)$$

де $z_\Sigma = \sqrt{r_n^2 + (x_p + x_n)^2}$; $\mu_\Sigma = (x_p + x_n)/r_n$; $\varphi_\Sigma = \arctg(\mu_\Sigma)$. Вирази для діючих значень $I, I_{(1)}, I_{(вг)}$ – відповідно струму i , його першої гармоніки $i_{(1)}$ та суми його вищих гармонік $i_{(вг)} = i - i_{(1)}$ дістаємо з аналогічних співвідношень, наведених у роботі [8] через заміну в них параметрів z, μ, φ відповідно на параметри $z_\Sigma, \mu_\Sigma, \varphi_\Sigma$. У результаті вирази для коефіцієнтів K_Γ і v можемо записати у вигляді

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{1-v^2}}{v}, \quad v = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\lambda^2 + \sin^2 \lambda - \sin \lambda \cos(2\alpha + \lambda)}{\lambda - \sqrt{1 + \mu_{\Sigma}^2} \sin \lambda \cos(2\alpha + \lambda + \varphi_{\Sigma})}}. \quad (3)$$

Для напруги на навантаженні маємо:

$$u_{\text{н}} = r_{\text{н}} i + x_{\text{н}} \frac{di}{d\vartheta}. \quad (4)$$

Підставляючи у співвідношенні (4) вираз для струму i із співвідношення (2), дістаємо:

$$u_{\text{н}} = \sqrt{2}U \sin(\varphi_{\Sigma}) \left[(\mu_{\text{н}} / \mu_{\Sigma} - 1) \sin(\alpha - \varphi_{\Sigma}) e^{\frac{\vartheta - \alpha}{\mu_{\Sigma}}} + \sin(\vartheta - \varphi_{\Sigma}) + \mu_{\text{н}} \cos(\vartheta - \varphi_{\Sigma}) \right], \quad (5)$$

де $\mu_{\text{н}} = x_{\text{н}} / r_{\text{н}}$.

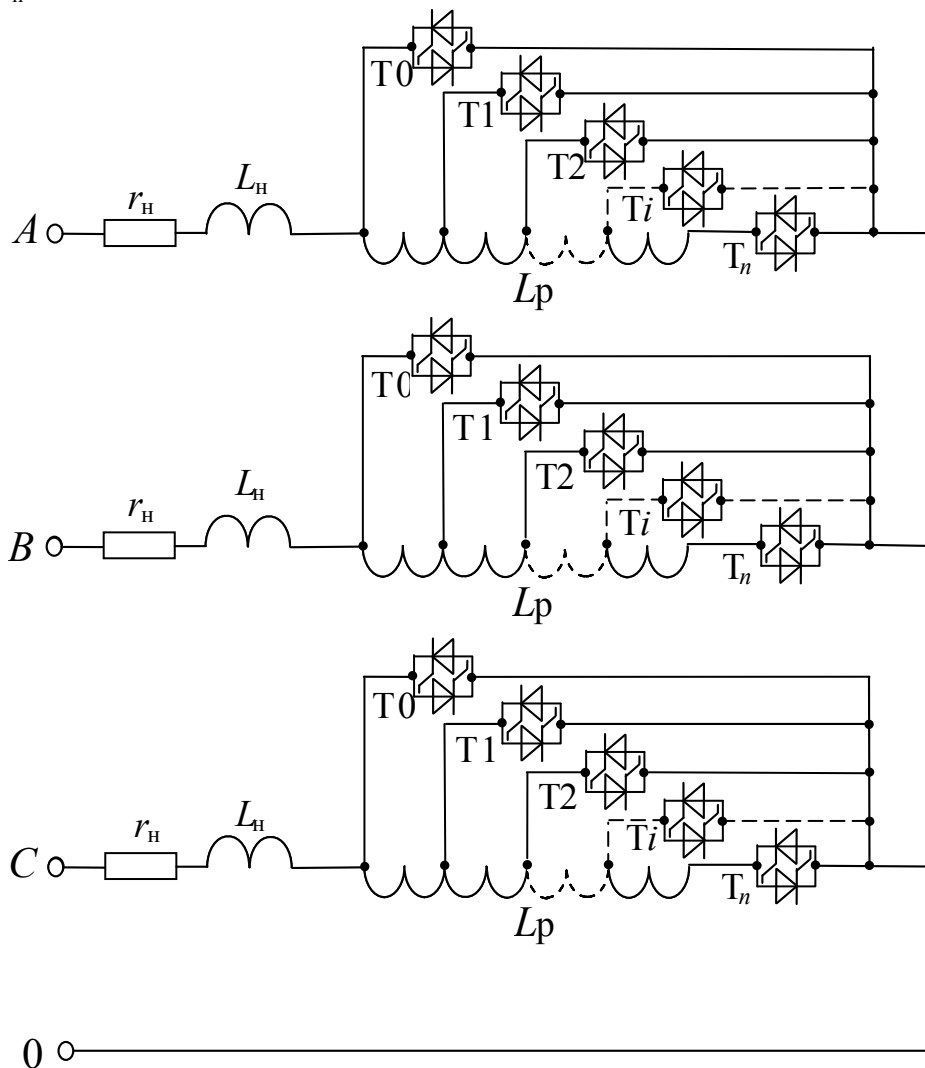


Рис. 1

Кут відставання першої гармоніки $i_{(1)}$ струму i від першої гармоніки $u_{(1)\text{н}}$ напруги на навантаженні $u_{\text{н}}$ у прийнятих позначеннях визначається як $\varphi_{\text{н}} = \arctg(\mu_{\text{н}})$.

Зважаючи на симетрію напруги $u_{\text{н}}$ на півперіодах, для визначення її діючого значення $U_{\text{н}}$ використовуємо формулу:

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} u_H^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\lambda} u_H^2 d\vartheta}. \tag{6}$$

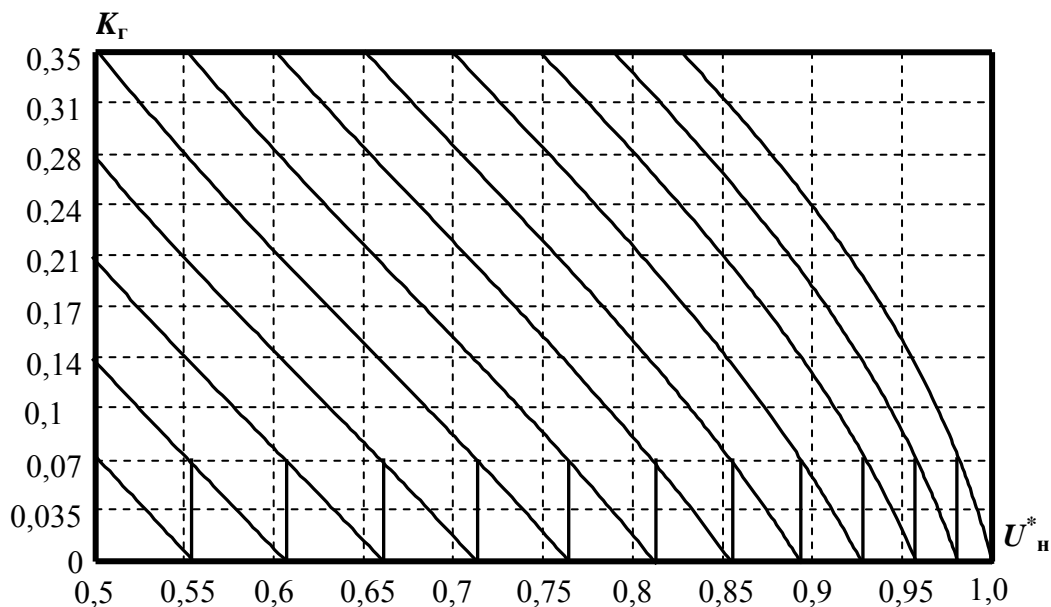


Рис. 2

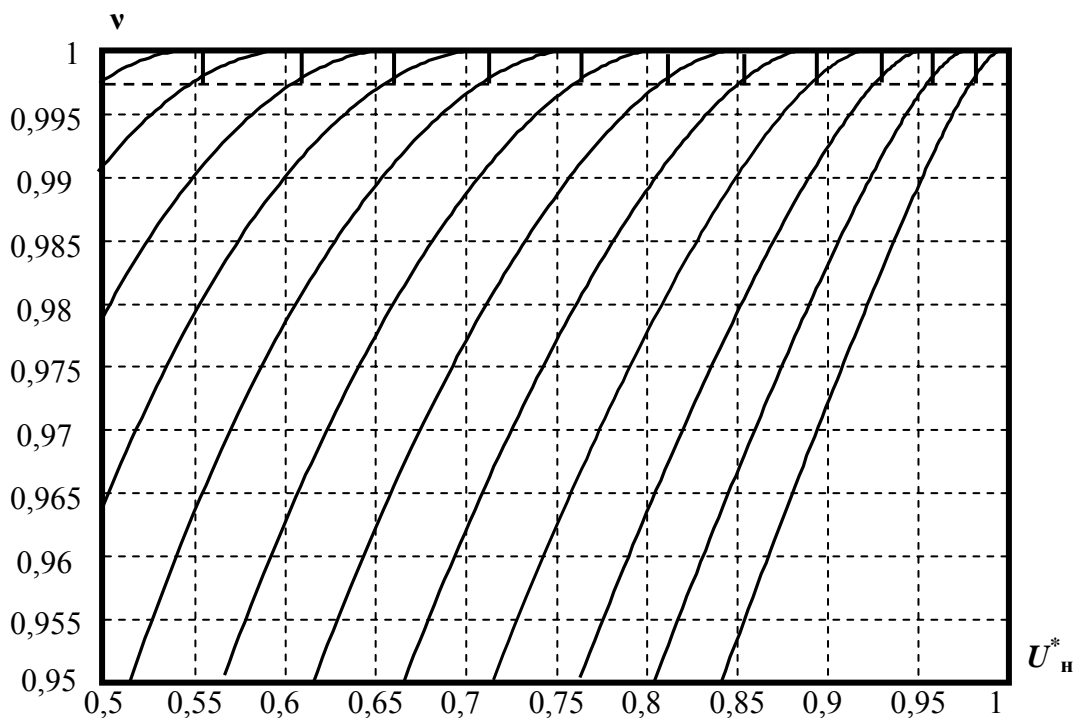


Рис. 3

Підставляючи у правій частині формули (6) замість u_H вираз для цієї напруги зі співвідношення (5) і з огляду на те, що кути α , λ , φ_{Σ} і параметр μ_{Σ} пов'язані між собою співвідношенням, яке випливає з рівняння (2) у разі підстановки в ньому значення $\vartheta = \alpha + \lambda$, за якого $i \equiv 0$ (гранична умова)

$$e^{\frac{\lambda}{\mu_{\Sigma}}} = \sin(\alpha + \lambda - \varphi_{\Sigma}) / \sin(\alpha - \varphi_{\Sigma}), \tag{7}$$

після здійснення інтегрування в правій частині формули (6) і тотожних перетворень дістаємо:

$$U_n^2 = \frac{U^2 \cos^2(\varphi_\Sigma)}{\pi} \left\{ (1 + \mu_n^2) \lambda - \sin \lambda \left\{ \left[1 - \mu_n^2 + 4 \frac{\mu_\Sigma^2}{1 + \mu_\Sigma^2} \left(\frac{\mu_n^2}{\mu_\Sigma^2} - 1 \right) \right] \cos(2\alpha + \lambda - 2\varphi_\Sigma) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\mu_\Sigma \left(\frac{\mu_n}{\mu_\Sigma} - 1 \right)^2 - \mu_n - 4 \frac{\mu_\Sigma^2}{1 + \mu_\Sigma^2} \left(\frac{\mu_n}{\mu_\Sigma} - 1 \right) \left(\mu_n - \frac{1}{\mu_\Sigma} \right) \right] \sin(2\alpha + \lambda - 2\varphi_\Sigma) \right\} \right\}. \quad (8)$$

Використовуючи отримані співвідношення (2), (3), (5), (7) і (8), розв'яжемо практичну задачу: скільки відпайок в індуктивному реакторі L_p потрібно, щоб у разі навантаження з $\cos \varphi_n = 0.9$ і глибини регулювання напруги U_n 50 % забезпечити для струму мережі i максимальне значення коефіцієнта гармонік $K_\Gamma^{\%} = 7\%$, коефіцієнт спотворень у такому випадку буде не меншим значення $\nu = 0.9975$, тобто щоб ці коефіцієнти були в межах, які визначаються такими нерівностями $0 \leq K_\Gamma \leq 0.07$ і $0.9975 \leq \nu \leq 1$. Задачу розв'язано методом послідовних наближень до оптимальних електричних параметрів реактора, за яких забезпечуються задані коефіцієнти K_Γ і ν для струму мережі. Результати розв'язання задачі у вигляді діаграм залежності коефіцієнтів K_Γ і ν від напруги, що регулюється, наведено на рис. 2 і 3.

На рис. 2 і 3 на осях абсцис відкладаються значення відносної величини напруги на навантаженні $U_n^* = U_n / U$, які вираховуємо за співвідношенням (7), а на осях ординат – відповідно значення коефіцієнтів K_Γ і ν , їх вираховуємо за формулами (3). Регулювання напруги за цими діаграмами відбувається за пилоподібними кривими – на діаграмі рис. 2 така крива розміщена нижче горизонтальної лінії $K_\Gamma = 0.07$, а відповідна їй пилоподібна крива на діаграмі рис. 3 розташована вище горизонтальної лінії $\nu = 0.9975$. Кожному «зубцю» пилоподібних кривих на діаграмах рис. 2 і 3 відповідає певний діапазон регулювання напруги U_n^* . Кожна з дванадцяти спадаючих крива $K_\Gamma(U_n^*)$ на діаграмі рис. 2 і кожна відповідна їй зростаюча крива $\nu(U_n^*)$ на діаграмі рис. 3 побудовані для певних визначених значень параметра μ_Σ . На практиці кожному з цих діапазонів регулювання відповідає конкретна відпайка індуктивного реактора, якій так само відповідає секція цього реактора з індуктивністю, що визначається параметром μ_Σ , визначеним для цього діапазону. У таблиці показано суміжні інтервали, на які розбито регулювання напруги U_n^* (у табл. відповідно діаграмам рис. 2 і 3 їх пронумеровано за допомогою j зліва направо), і наведено відповідне кожному з цих інтервалів значення параметра $\mu_{\Sigma j}$ (якому своєю чергою відповідає крива $K_{\Gamma j}(U_n^*)$ на діаграмі рис. 2 чи крива $\nu_j(U_n^*)$ – на діаграмі рис. 3, за якою здійснюється регулювання на цьому (j -тому) інтервалі, де позначення " j " в індексі вказує номер інтервалу, якому ці параметр і криві відповідають. У таблиці також наведено значення відносної індуктивності L_{pci}^* обмотки кожної i -ої секції реактора і значення відносної індуктивності L_{pi}^* , яка відповідає i -тій відпайці обмотки реактора (тобто частині обмотки, розташованій між початком обмотки реактора та i -тою її відпайкою).

Таблиця

Номер інтервалу регулювання (зліва направо) j	Номер секції реактора (номер відпайки) i	Інтервал регулювання U_H^*	Значення параметра μ_Σ	Відносна індуктивність i -ої секції реактора $L_{pci}^* = x_{pci}^* / \omega$	Відносна індуктивність реактора для i -ої відпайки $L_{pi}^* = \sum_{k=1}^i L_{pck}^*$
1	–	$1 \geq U_H^* \geq 0.981$	$0.485 = \mu_H$	–	–
2	1	$0.981 \geq U_H^* \geq 0.958$	0.533	$1.53 \cdot 10^{-4}$	$1.53 \cdot 10^{-4}$
3	2	$0.958 \geq U_H^* \geq 0.929$	0.59	$1.81 \cdot 10^{-4}$	$3.34 \cdot 10^{-4}$
4	3	$0.929 \geq U_H^* \geq 0.895$	0.66	$2.23 \cdot 10^{-4}$	$5.57 \cdot 10^{-4}$
5	4	$0.895 \geq U_H^* \geq 0.853$	0.74	$2.55 \cdot 10^{-4}$	$8.12 \cdot 10^{-4}$
6	5	$0.853 \geq U_H^* \geq 0.813$	0.83	$2.86 \cdot 10^{-4}$	$10.98 \cdot 10^{-4}$
7	6	$0.813 \geq U_H^* \geq 0.765$	0.933	$3.28 \cdot 10^{-4}$	$14.26 \cdot 10^{-4}$
8	7	$0.765 \geq U_H^* \geq 0.713$	1.055	$3.88 \cdot 10^{-4}$	$18.14 \cdot 10^{-4}$
9	8	$0.713 \geq U_H^* \geq 0.66$	1.195	$4.46 \cdot 10^{-4}$	$22.60 \cdot 10^{-4}$
19	9	$0.66 \geq U_H^* \geq 0.607$	1.345	$4.77 \cdot 10^{-4}$	$27.37 \cdot 10^{-4}$
11	10	$0.607 \geq U_H^* \geq 0.552$	1.535	$6.05 \cdot 10^{-4}$	$33.42 \cdot 10^{-4}$
12	11	$0.552 \geq U_H^* \geq 0.5$	1.745	$6.72 \cdot 10^{-4}$	$40.14 \cdot 10^{-4}$

$$L_{pci}^* = x_{pci}^* / \omega = x_{pci} / r_H \omega = (\mu_{\Sigma_{i+1}} - \mu_{\Sigma_i}) / \omega,$$

$$L_{pi}^* = x_{pi}^* / \omega = x_{pi} / r_H \omega = (\mu_{\Sigma_i} r_H - x_H) / r_H \omega = (\mu_{\Sigma_i} - \mu_H) / \omega, \quad (9)$$

де $\mu_{\Sigma_{i+1}}$, μ_{Σ_i} – значення параметра μ_Σ , які відповідають $i+1$ -ій та i -тій відпайкам обмотки реактора, тобто частинам обмотки, які розташовані між початком обмотки реактора і відповідно його $i+1$ -ою та i -тою відпайками; x_{pi} – індуктивний опір частини обмотки реактора, яка розташована між початком обмотки реактора і його i -тою відпайкою; x_{pci} – індуктивний опір обмотки i -тої секції реактора, тобто такої, яка розташована між $i+1$ -ою та i -тою відпайками. З огляду на позначення, введені в співвідношеннях (9), маємо:

$$L_{pi}^* = \sum_{k=1}^i L_{pck}^* \quad (10)$$

Як видно з діаграм, для розв'язання поставленої задачі забезпечення на всій глибині (а саме глибині 50 %) регулювання напруги U_H значень коефіцієнтів $K_\Gamma \leq 0.07$ і $v \geq 0.9975$ – знадобилося лише 11 секцій реактора, яким відповідають приведені в таблиці значення відносних індуктивностей L_{pci}^* і L_{pi}^* . Сам процес регулювання напруги в такому разі розбивається на 12 інтервалів, на першому з яких реактора немає – його у разі протікання колом РЗН струму мережі закорочено відкритими вентилями Т0. На кожному з цих

інтервалів регулювання здійснюється за кривими $K_{Гj}(U_n^*)$ і $v_j(U_n^*)$, які відповідають конкретному визначеному для цього j -того інтервалу значенню параметра $\mu_{\Sigma j}$. Перехід з одного інтервалу на інший на практиці здійснюється перемиканням відпайок обмотки реактора, які вводять у коло, за яким замикається струм i , чергову секцію реактора, змінюючи тим самим його сумарну (за формулою (10)) індуктивність.

Розв'язання розглянутої конкретної тестової задачі можна узагальнити на клас подібних задач, де всюди належною кількістю секцій реактора теоретично можна забезпечити в процесі плавного регулювання напруги будь-яке (доцільне) наперед задане значення коефіцієнтів $K_{Г}$ і v для будь-якої глибини регулювання напруги на активно-індуктивному навантаженні. На практиці кількість подібних секцій реактора вочевидь обмежується з техніко-економічних міркувань.

Висновок. Отже, запропонований спосіб [9] регулювання змінної напруги може ефективно застосовуватись і в трифазному РЗН із зустрічно-паралельними тиристорами і нульовим проводом, де в процесі регулювання ним змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні таке схемотехнічне рішення забезпечує належну якість струму мережі. Використання запропонованого способу [9] і розробленого засобу його реалізації (за схемою рис. 1) дасть змогу досягти такої якості енергії, що передається електричною мережею, яка б відповідала нинішнім стандартам, і забезпечити належну електромагнітну сумісність мережі зі споживачами.

Фінансується за держбюджетною темою "Розроблення засобів коригування режимів електричних мереж при підключенні потужного обладнання зі специфічними характеристиками" (Програма "Ресурс-3") за Розпорядженням Президії НАН України №182 від 29.03.2021, реєстраційний номер 0121U110509. КПКВК 6541030.

1. Про затвердження Кодексу систем передачі: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 309.
2. Про затвердження Кодексу систем розподілу: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310.
3. Блинов И.В., Парус Е.В., Полищук Е.Ю., Журвалев И.В. Мониторинг воздушных линий электропередачи с использованием индикаторов повреждений. Электроэнергетические системы и сети. 2013. № 4. С. 42–44.
4. Критская Т.В., Быткин С.В. Перспективные полупроводниковые материалы для использования в силовой электронике. *Вісник ТУ "ХПИ"* № 26 (1302). 2018. Серія "Нові рішення сучасних технологій". С. 148–158.
5. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. М.: Изд. «Энергия». 1973. 249 с.
6. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Изд. «Наукова думка». 1983. 216 с.
7. Чиженко А.И. Вентильные мостовые регуляторы переменного напряжения. К.: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины. 1999. 130 с.
8. Волков И.В., Чиженко А.И., Курило И.А. Трехфазный вентильно-дроссельный преобразователь переменного напряжения. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. Вип. 26. С. 90–94.
9. Волков И.В., Липківський К.О., Чиженко О.І. Спосіб плавного регулювання змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні. Деклараційний пат. 48865 Україна А МКИ 7 Н 02 Р 13/30, Н 02 М5/10. Опубл. 15.08.2002. Бюл. №8.
<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=74302&chapter=biblio>

CORRECTION OF THE QUALITY OF CURRENT OF THE ELECTRIC NETWORK WITH A THYRISTOR REGULATOR OF AC VOLTAGE WITH ACTIVE-INDUCTIVE LOAD

A.I. Chyzenko, I.V. Blinov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The use of the AC voltage control method is considered. In this method, the improvement of the current quality of the supply network is achieved by a discrete change of the inductance in the network current flow circuit. In this method, it

is proposed to use a circuit with counter-parallel thyristors and the neutral wire. The dependences of the harmonic coefficient and the current distortion coefficient of the electric network on the values of the regulated voltage are constructed. The obtained dependences prove the effectiveness of the proposed regulator. The required number of reactor sections is determined and the proper inductance of their windings to provide the values of the harmonics coefficient that does not exceed 7% while adjusting the voltage depth of 50% on the active-inductive load. References 9, figures 3, table.

Keywords: AC voltage regulator, control method, network current quality, inductive reactor, reactor winding section, winding tap-off.

1. On approval of the Transmission System Code. Resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition. No 309 of March 14. 2018.
2. On approval of the Distribution Network Code. Resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition. No 310 of March 14. 2018.
3. Blinov I.V., Parus E.V., Polischuk E.Y., Zhuravlov I.V. Monitoring of overhead power lines using fault indicators. *Elektroenergeticheskie sistemy i seti*. 2013. No 4. Pp. 42–44. (Rus)
4. Kritskaya T.V., Bytkin S.V. Perspective semiconductor materials for using in the power electronics. *Bulletin of NTU KhPI. Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU KhPI. 2018. No 26 (1302). Pp. 148–158. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.26.21>
5. Toshihiro J. Takeuchi Theory of SCR circuit and application to motor control, Electrical Engineering College Press, Tokyo 1968.
6. Lypkivskyi K.A. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus)
7. Chyzhenko A. Semiconductor full-bridge AC voltage controllers. Institute of Electrodynamics Press, Kyiv 1990. 130 p. (Rus)
8. Volkov I.V., Chyzhenko A.I., Kurilo I.A. Three-phase thyristor-reactor inverter AC voltage. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. No 26. Pp. 90–94. (Rus)
9. Volkov I.V., Lypkivsky K.O., Chyzhenko O.I. Method of smooth regulation of alternating voltage on the active-inductive load. Patent of Ukraine No 48865 AMKI 7 H 02 P 13/30, H 02 M5/10, 2002. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=74302&chapter=biblio>

Надійшла: 23.03.2021
Received: 23.03.2021