

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.037>

ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОРИГУВАННЯ ФОРМИ НАПРУГИ МЕРЕЖІ, ЯКА ЖИВИТЬ ПОТУЖНИЙ КЕРОВАНИЙ ВИПРЯМЛЯЧ

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

Запропоновано схемотехнічне рішення пристрою для коригування форми напруги мережі, яка живить керований вентиляльний випрямляч зіставної з нею потужності. У ньому провали та підвищення у фазній напрузі мережі, які виникають під час комутації струму з однієї фази на іншу, компенсуються коригуючими імпульсами, що трансформуються в ці фази з фази незадіяної в комутації за допомогою трансформаторів. Ланка коригування фазної напруги мережі, яка формує коригуючі імпульси, підключається до випрямляча у кожній фазі за допомогою чотирьох груп вентилів, кожна з яких містить два зустрічно-паралельні керовані тиристори, які поєднують випрямляч з фазами мережі і її нульовим проводом. Описано алгоритм керування керованими тиристорами. Бібл. 8, рис. 2.

Ключові слова: коригування напруги, випрямляч, якість напруги.

Сьогодні підвищення ефективності електропостачання споживачів, забезпечення стандартів якості електричної енергії, встановлених в кодексах системи передачі та розподілу [1, 2], що використовуються у практичній діяльності оператора системи передачі та операторів систем розподілу [3, 4], є важливим напрямом розвитку електроенергетики в сучасних ринкових умовах [5]. Однією з найважливіших вимог до сучасних напівпровідникових керованих перетворювачів електричної енергії є забезпечення їхньої електромагнітної сумісності з мережею [6] і з встановленим у мережі іншим навантаженням. У разі живлення від мережі керованого випрямляча, зібраного на тиристорах, особливого значення набуває якість напруги на його вході. Робота керованих вентиляльних випрямлячів зіставної з мережею потужності супроводжується суттєвим спотворенням форми напруги мережі. Це пов'язано з процесами комутації струму вентилями, що відбуваються у випрямлячі під час випрямлення змінної напруги. Перехід струму з вентилів однієї фази на вентилі іншої фази випрямляча внаслідок наявності в контурі комутації власної індуктивності мережі L_a , яка складається з індуктивності обмоток розподільчих трансформаторів та індуктивності лінії передачі енергії, не може бути миттєвим. Тому впродовж деякого часу (інтервалу комутації) фази, що задіяні у комутації, виявляються закочороченими одночасно відкритими вентилями: тим, що входить за чергою у роботу, та тим, що з неї виходить. У цей інтервал часу (який вимірюється кутом комутації γ) в мережі протікають струми короткого замикання, які призводять до падіння напруги на опорах $x_a = \omega L_a$ ($\omega = 2\pi f$; f – частота напруги живлення). Ці падіння напруги вирізають або додають у фазних напругах мережі так звані комутаційні площинки, що призводить до виникнення у напругах мережі провалів та підвищень. Такі провали та підвищення напруги у разі, коли потужність випрямляча зіставна з потужністю мережі, що його живить, за деяких значень кутів керування вентилями α та комутації вентилів γ , а також відповідних значень величини середнього значення випрямленого струму I_d , суттєво спотворюють форму напруги мережі, що ставить під сумнів ефективність застосування традиційних схем випрямлячів. Тому розроблення ефективних схемотехнічних рішень подолання цієї проблеми, які відріз-

нялися б від альтернативних кращими техніко-економічними показниками, є актуальною проблемою.

Метою роботи є нове схемотехнічне рішення пристрою коригування форми напруги мережі у разі живлення від неї керованого випрямляча зіставної потужності з належними техніко-економічними та масогабаритними показниками.

Ідея рішення, що пропонується, полягає в реалізації способу [7], за якого компенсація провалів та підвищень у напрузі мережі здійснюється за допомогою імпульсів коригування, що трансформуються в мережу за допомогою трифазного трансформатора, вторинні обмотки якого ввімкнені в розрив фазних дротів мережі й діють за принципом вольтододавання. Джерела напруги живлення первинних обмоток цих трансформаторів можуть варіюватися.

У роботі [7] запропоновано пристрій, де ланка коригування форми напруги мережі, що містить три однофазні трансформатори вольтододавання, первинні обмотки яких у кожній фазі живляться від виходу випрямляча, тобто від випрямленої ним напруги.

Недоліком цього пристрою є те, що його неможливо використовувати з випрямлячами, які виконані в такий спосіб, що в них немає фізичного доступу до їхнього виходу. Схемотехнічне рішення, яке розробляється, позбавлене необхідності втручання у потужне обладнання, яке у збірці містить випрямляч і яке часто має складні схеми монтажу силових та сигнальних дротів, що суттєво ускладнює пошук точок під'єднання (вихідних клем випрямляча) у разі живлення від виходу випрямляча.

У пристрої для коригування форми напруги мережі, який пропонується, первинні багатополоскові обмотки у всіх фазах під'єднуються через групи вентилів та дільник напруги безпосередньо до інших фаз мережі.

Схема цього рішення показана на рис. 1, де: 1) мережа, змодельована колом,

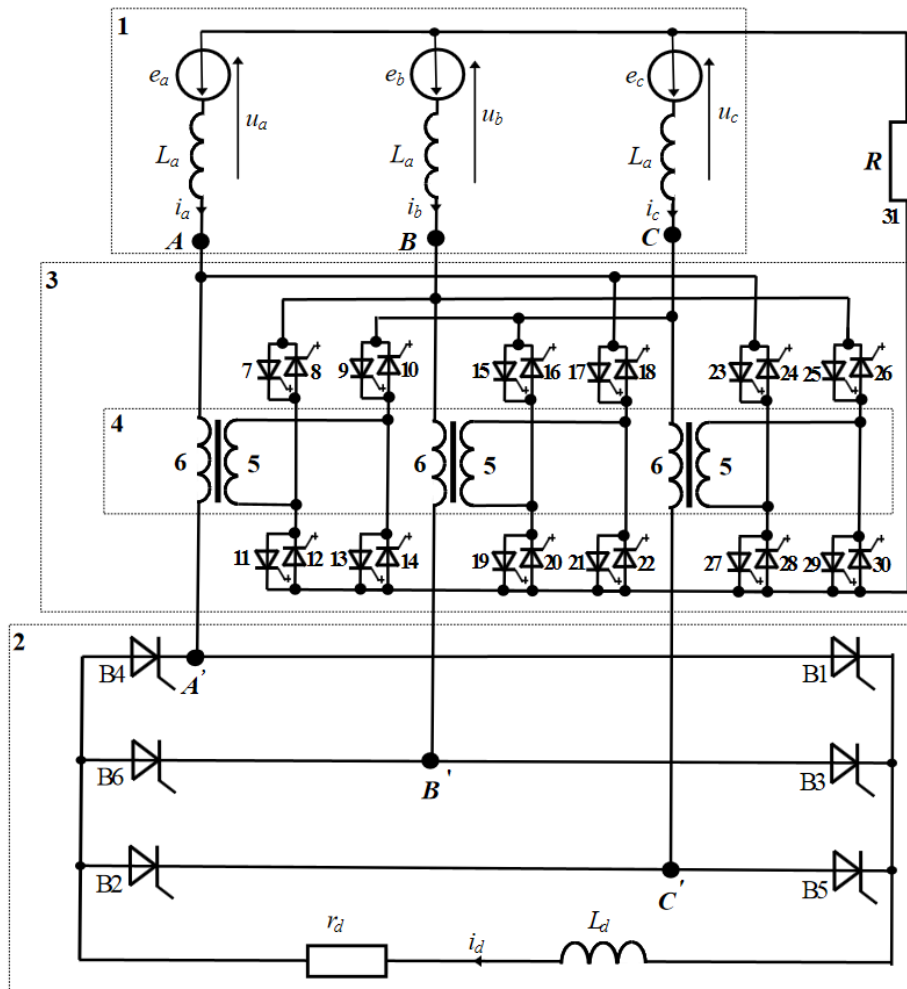


Рис. 1

обведеним пунктирним прямокутником, позначеним цифрою 1, у якому e_a , e_b і e_c – моделюють трифазну систему ЕРС вторинної обмотки розподільчого трансформатора на вході мережі, L_a – моделює індуктивність мережі, в якій враховується індуктивність лінії електропередачі (ЛЕП) та індуктивність обмоток розподільчого трансформатора (РТ) на вході мережі; 2) випрямляч, який на схемі виділено пунктирним прямокутником та позначено цифрою 2, що містить випрямний тиристорний міст, підключений до фазних клем мережі A' , B' і C' , зібраний на тиристорах В1–В6, у діагональ випрямленого струму якого увімкнено навантаження з опором r_d , послідовно з яким увімкнено згладжувальний дросель з індуктивністю L_d ; 3) ланка коригування напруги мережі, яка на схемі обведена пунктирним прямокутником та позначена цифрою 3, – з трансформаторами (на схемі позначені цифрою 4), вторинні маловиткові обмотки яких (позначені цифрою 6) увімкнено у розрив фазних дротів мережі на вході випрямляча (тобто між фазними клемми A , B , C і клемми A' , B' , C'), а первинні багатовиткові обмотки (позначені цифрою 5) приєднано у кожній фазі за допомогою чотирьох груп вентилів, кожна з яких містить два зустрічно-паралельно увімкнені запірні тиристори, що, через дільник напруги – керований потенціометр R (його позначено числом 19), яким регулюються амплітуди коригуючих імпульсів, – до фаз мережі. Вентиль групи, провідність якого здійснюється від фази до нульового проводу, далі називаємо прямим, а вентиль зі зворотною провідністю – зворотним, ці групи вентилів на рис. 1 пронумеровано від 7 до 18. Особливістю їхнього приєднання є те, що дві групи з них у кожній фазі поєднують вторинні обмотки з фазами мережі, причому одна з них приєднана до початку обмотки, а інша – до її кінця, а інші дві групи поєднують цю обмотку з нульовим проводом, де одна з цих груп приєднана до початку обмотки, а інша – до її кінця.

Для пояснення особливостей запропонованого способу приєднання первинних обмоток 5 імпульсних трансформаторів 4 ланки коригування форми напруги мережі 3 розглянемо відомі з технічної літератури вирази для напруг мережі u_a , u_b і u_c на інтервалі комутації, на якому за допомогою вентилів В1–В6 випрямляча відбувається комутація струму з однієї фази мережі на іншу. З підручників з перетворювальної техніки [8] відомо, що на інтервалі, який відповідає комутації струму з фази C на фазу A , маємо:

$$u_a = u_c \approx \frac{e_a + e_c}{2} = -\frac{e_b}{2}; \quad (1)$$

відповідно на інтервалі комутації струму з фази A на фазу B :

$$u_a = u_b \approx \frac{e_a + e_b}{2} = -\frac{e_c}{2}; \quad (2)$$

на інтервалі комутації струму з фази B на фазу C :

$$u_b = u_c \approx \frac{e_b + e_c}{2} = -\frac{e_a}{2}. \quad (3)$$

У співвідношеннях (1)–(3) знак « \approx » використовується тому, що пульсаціями випрямленого струму i_d нехтуємо (тобто вважаємо, що струм $i_d = I_d$ – абсолютно згладжений), внаслідок чого струм, який замикається по колу: фази мережі–діагональ випрямленого струму тиристорного (В1–В6) моста, не спричиняє падіння напруги на індуктивності L_a . Падіння напруги на L_a за прийнятих припущень спричиняє лише струм короткого замикання (КЗ) фаз мережі. КЗ фаз мережі спричиняють одночасно відкриті вентиля однієї групи (анодної або катодної), за допомогою яких і здійснюється комутація струму мережі.

Із співвідношень (1)–(3) випливає така закономірність, що на інтервалі комутації напруга фаз мережі, які беруть участь у процесі комутації, математично виражається через напругу третьої фази, яка у процесі комутації участі не бере. Ця закономірність стала основою ідеї, яку реалізовано у випрямлячі за схемою на рис. 1, і яка полягає в тому, що компенсація провалів чи підвищень у фазних напругах мережі, які виникають у процесі комутації струму з однієї фази на іншу, здійснюється трансформацією у ці фази напруги з третьої фази, що у цьому процесі комутації не задіяна. У схемі на рис. 1 приєднання напруги такої вільної від

процесу комутації фази до вторинних обмоток 5 трансформаторів 4 здійснюється за допомогою запірних вентилів 7–18. Ці вентиля пропускають струм виключно на інтервалах комутації.

Для розрахунків параметрів режимів у моделі засобу за схемою (рис. 1) було розроблено спеціальну розрахункову програму. Розрахунки параметрів режимів за цією програмою для режиму $\alpha = \text{const}$, $r_d - \text{varia}$ наведені у таблиці.

r_d , Ом	γ° , ел. град	U_a , В	S_{ca} , В·ел. рад	I_d , А	P_d , МВт
0.03	41.8	197.5	97.3	11769.3	4.16
0.05	32.4	207.1	66.4	8019.0	3.21
0.07	26.6	211.6	49.1	6080.5	2.59
0.1	23.2	214.6	35.9	4461.6	1.99
0.2	14.8	217.6	20.0	2370.9	1.12
0.4	9.0	218.9	10.6	1224.3	0.60
0.7	6.5	219.5	7.0	709.7	0.35
1.0	5.0	219.7	5.5	499.7	0.25

Примітка: у табл. використовуються такі позначення: γ° – кут комутації (збігається з шириною комутаційних площинок); U_a – діюче значення спотвореної фазної напруги; S_{ca} – величина комутаційної площинки (вимірюється у вольтах, помножених на електричний радіан; I_d – середнє значення випрямленого струму i_d ; P_d – потужність, яка споживається випрямлячем.

Алгоритм керування вентилями пристрою коригування форми напруги мережі за запропонованою схемою розглянуто на прикладі діаграм фазних напруг мережі, які побудовані для випрямляча за умов відсутності в ньому ланки коригування форми напруги мережі. Це відповідає випадку, коли в цій схемі усі вентиля (позиції 7–18 на рис. 1) є постійно закритими. У таблиці розрахунки здійснено для таких параметрів елементів моделі: амплітуда ЕРС $E_m = \sqrt{2} \cdot 220$ В, частота напруги живлення $f = 50$ Гц, індуктивність L_a , в якій враховується індуктивність лінії електропередачі та індуктивність обмоток розподільного трансформатора, а також активний опір r_a мережі мають значення $L_a = 2.77 \cdot 10^{-5}$, $r_a = 0.0028$; активний опір навантаження випрямляча $r_d = 0.1$ Ом; індуктивність згладжувального дроселя у колі випрямленого струму $L_d = 80 \cdot 10^{-3}$ Гн; опір відкритих тиристорів $r_{\text{В1-6від}} = 0.0001$ Ом; опір закритих тиристорів $r_{\text{В1-6зак}} = 5000$ Ом; кут управління тиристорами В1–В6, відміряється від точки перетину синусоїд фазних ЕРС e_a і e_c (відповідно фаз А і С) $\alpha = 20$ ел. град ($\pi/18$ ел. рад). На рис. 2 наведено діаграми фазних напруг u_a , u_b і u_c , які побудовані за розробленою програмою для наведених вище значень параметрів на інтервалі, що охоплює півперіод напруги живлення, де $\vartheta = \omega t$, $\omega = 2\pi f$, t – поточна часова координата.

У момент $\vartheta = \alpha$ у випрямному мості, зібраному на вентилях В1–В6, починається комутація струму з фази С на фазу А. Під час цієї комутації пропускають струм у вентилі В5 (виходить із роботи наприкінці комутації), В6 та В1 (вступає в роботу на початку комутації). Одночасно у напрузі u_a фази А, як видно з діаграм фазних напруг, зображених на рис. 2, впродовж інтервалу комутації $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma$ в її наслідок формується провалина, а у напрузі u_c фази С навпаки – підвищення. Для компенсації цих спотворень форми напруги в момент $\vartheta = \alpha$ відкриваються зворотні вентиля у тиристорних групах 7, 9, 16 і 18. Через зворотні вентиля груп 7 і 9 до первинної обмотки 5 імпульсного трансформатора фази А прикладається частина додатної на інтервалі $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma$ напруги $-e_b > 0$. Інша частина цієї напруги падає на керованому потенціометрі R. Запірними тиристорами з груп 7–12 та потенціометром R з цієї напруги формується додатний коригуючий імпульс відповідної тривалості та амплітуди, який трансформується імпульсним трансформатором у фазу А мережі, де компенсують западину, яка утворилася там внаслідок процесу комутації. Для забезпечення належної крутизни заднього фронту цього імпульсу в момент $\vartheta = \alpha + \gamma$ відпираються усі тиристори груп 7–10, які разом закорочують первинну обмотку 5 і тим самим обнуляють напругу на ній.

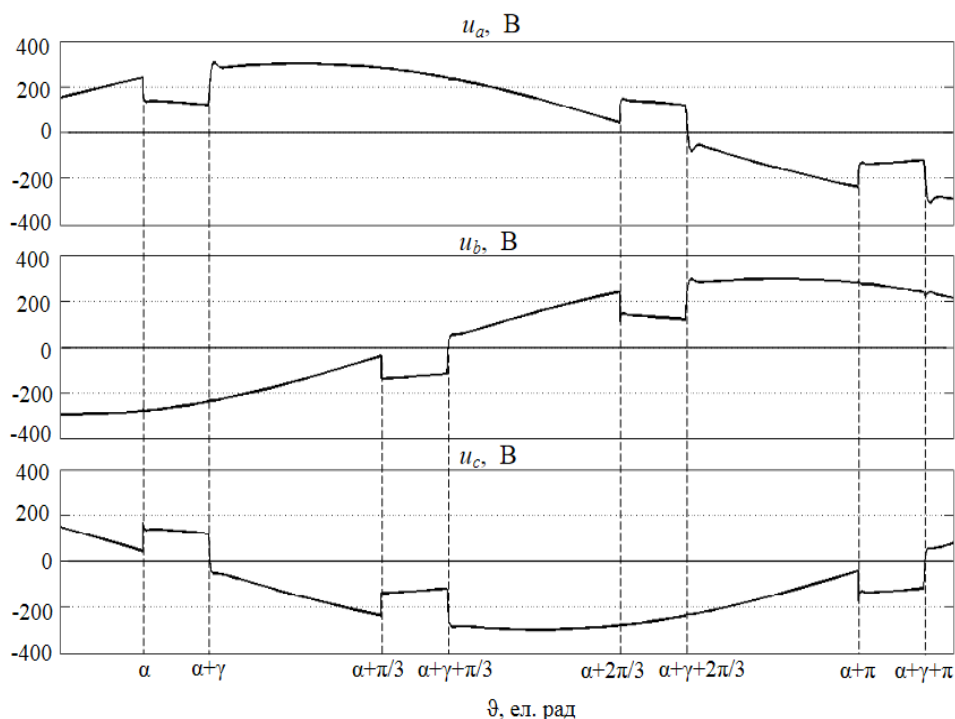


Рис. 2

Після закінчення формування заднього фронту коригуючого імпульсу, тобто у момент $\vartheta = \alpha + \gamma + \delta$, де кут δ відповідає тривалості спадання заднього фронту цього імпульсу до нуля, усі вентиля груп 7–10 примусово запираються. Саме для цієї дії і потрібні повністю керовані тиристори. Це обумовлюється тим, що звичайні тиристори були б відкритими аж до спадання струму через них до нуля і весь цей час на потенціометрі R виділялося б тепло, що погіршувало б техніко-економічні показники пристрою. На тому ж інтервалі $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma$ у фазі C через зворотні вентиля груп 16 і 18 до первинної обмотки 5 імпульсного трансформатора прикладається частина від'ємної напруги $e_b < 0$, і тиристорами груп 16–18 формується коригуючий імпульс негативної полярності, який трансформується у фазу C мережі, де компенсує у напрузі u_c підвищення, який утворився внаслідок цього процесу комутації. Для забезпечення крутизни заднього фронту цього імпульсу у момент $\vartheta = \alpha + \gamma$ всі вентиля груп 16–18 відкриті, а в момент $\vartheta = \alpha + \gamma + \delta$ вони усі примусово запираються.

У момент $\vartheta = \alpha + \pi/3$ починається комутація струму з фази B мережі на фазу C – струм за цієї комутації пропускають вентиля В6 (у кінці комутації в момент $\vartheta = \alpha + \gamma + \pi/3$ виходить із роботи), В1 і В2 (у момент $\vartheta = \alpha + \pi/3$ вступає у роботу). У напругах u_b і u_c відповідно фаз B і C виникають підвищення та зниження. Для компенсації їх у момент $\vartheta = \alpha + \pi/3$ у фазі B відкриваються прямі вентиля груп 12 і 14, через які та потенціометр R до первинної обмотки 5 імпульсного трансформатора цієї фази прикладається частина додатної на інтервалі комутації $\alpha + \pi/3 \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma + \pi/3$ напруги $e_a > 0$, а у фазі C – прямі вентиля груп 15 і 17, через які та потенціометр R до первинної обмотки 5 прикладається частина від'ємної напруги $-e_a < 0$. У фазі B вентилями груп 12–14 на інтервалі комутації $\alpha + \pi/3 \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma + \pi/3$ формується за алгоритмом, описаним для попередньої комутації, коригуючий імпульс додатної полярності, який трансформується імпульсним трансформатором у цю фазу мережі, де коригує форму напруги u_b . У фазі C вентилями груп 15, 17 і 18 формується коригуючий імпульс від'ємної полярності, який трансформується у цю фазу мережі, де коригує форму напруги u_c .

У момент $\vartheta = \alpha + 2\pi/3$ починається комутація струму з фази A мережі на фазу B – струм за цієї комутації пропускають вентиля В1 (у момент $\vartheta = \alpha + \gamma + 2\pi/3$ виходить з роботи), В2 і В3 (входить у роботу в момент $\vartheta = \alpha + 2\pi/3$). Для компенсації спотворень форми напруги мережі на інтервалі комутації $\alpha + 2\pi/3 \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma + 2\pi/3$, у фазі A у момент $\vartheta = \alpha + 2\pi/3$ відкриваються зворотні вентиля груп 8 і 10, через які до обмотки 5 цієї фази прикладається частина від'ємної на цьому інтервалі напруги $e_c < 0$, а у фазі B – зворотні вентиля груп 11 і 13, через які до обмотки 5 цієї фази прикладається частина напруги $-e_c > 0$. У фазі A вен-

тиями груп 8–10 формується коригуючий імпульс від'ємної полярності, який компенсує підвищення напруги u_a , а у фазі B вентилями 11, 13 і 14 – імпульс додатної полярності, який компенсує западину в напрузі u_b .

На інтервалі $\alpha + \pi \leq \vartheta \leq \alpha + \gamma + \pi$ знову відбувається процес комутації струму з фази C на фазу A , але за від'ємних півхвиль напруг цих фаз. На цьому інтервалі пропускають струм вентилялі В2, В3 і В4. Для компенсації спотворень напруги мережі на цьому інтервалі у фазі A відпираються прямі вентилялі груп 7 і 9, через них до обмотки 5 прикладається частина напруги $-e_b < 0$, а у фазі C – прямі вентилялі груп 16 і 18, через які до обмотки 5 прикладається частина напруги $e_b > 0$. Вентилями 7, 9 і 10 у фазі A формується імпульс негативної полярності для коригування в мережі форми напруги u_a , а вентилями 16–18 у фазі C – імпульс додатної полярності для коригування форми напруги u_c .

Зважаючи на симетрію перетворювача (рис. 1) щодо фаз мережі, симетрію в управлінні його вентилями, а також симетрію самої напруги живлення, можна стверджувати, що процеси, які відбуваються на наступному півперіоді, повністю аналогічні і тому в межах цієї публікації не розглядаються.

Керований потенціометр R виконує роль дільника напруги, він регулює активний опір, який вноситься у коло живлення ланки коригування форми напруги мережі, що необхідно для забезпечення належного рівня амплітуд коригуючих імпульсів напруги, які трансформуються у мережу.

Висновки. Запропоноване схемотехнічне рішення пристрою у порівнянні з аналогічними рішеннями забезпечує коригування форми напруги мережі, де імпульси для коригування форми напруги мережі трансформуються не з виходу випрямляча (як у прототипі), а безпосередньо з інших фаз мережі, які у цей час незадіяні у процесі комутації струму мережі. Запропоноване рішення розширює функціональні можливості пристрою, робить його простішим і універсальним, що розширює сферу використання відповідних систем та обумовлює практичну важливість. Застосування запропонованого схемотехнічного рішення, у якому на практиці спрощується приєднання до випрямлячів ланок коригування форми напруги мережі, дає змогу зменшити витрати на додаткові пусконаладжувальні роботи, які є необхідними в разі приєднання альтернативних пристроїв. Останнє забезпечує значний потенційний економічний ефект.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів» 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. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Під заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
4. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы. Под общ. ред. акад. НАН Украины А.В. Кириленко. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. 408 с.
5. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку ринку електричної енергії України (за мат. наук. доп. на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). *Вісник НАН України*. 2021. № 3. С. 20–28. DOI: doi.org/10.15407/visn2021.03.020
6. Tang L., McGranaghan M., Ferraro R., Morganson S. and Hant B. Voltage notching interaction caused by large adjustable speed drives on distribution systems with low short circuit capacities. *IEEE Trans Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1996.
7. Чиженко О.І. Спосіб коригування форми напруги мережі, що живить випрямляч з'єднаною з нею потужності, та пристрій для його реалізації. Пат. України №117053. МПК Н03К 7/2 (2006.01), Н02М 7/162(2006.01), Н03М 3/53 (2006.01). Опубл. 2018. Бюл. № 11.
8. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. Изд. «Высшая школа», Москва. 1974. 432 с.

DEVICE FOR CORRECTING THE LINE VOLTAGE WAVEFORM THAT FEEDS A HIGH-POWER CONTROLLED RECTIFIER

O.I. Chyzhenko, I.V. Blinov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: alivchizh@ukr.net, blinovigor81@gmail.com

A circuit solution of a device for correcting the waveform of the mains voltage, which feeds a controlled semiconductor rectifier of comparable power, is proposed. The sags and swells in the mains phase voltage, which occur during current switching from one phase to another, are compensated by correction pulses, which are transformed into these phases from the phase, which is not involved in switching, using transformers. The mains phase voltage correction circuit, which generates the correction pulses, is connected to the rectifier by four groups of gates in each phase. These groups contain two counter-parallel controlled thyristors, which connect the rectifier to the network phases and its neutral conductor. An algorithm for controlling the controlled thyristors is described. Ref. 8, fig. 2.

Keywords: voltage adjustment, rectifier, voltage quality.

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. Intelligent electrical networks: elements and modes. Kyiv, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p. (Ukr)
4. Intelligent power systems: elements and modes. Kyiv, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2014. 408 p. (Rus)
5. Blinov I. Problems of functioning and development of the electricity market of Ukraine (According to the scientific report at the meeting of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 3, 2021). *Visnyk NAN Ukraine*. 2021. Vol. 3. Pp. 20–28. (Ukr) DOI: doi.org/10.15407/visn2021.03.020
6. Tang L., McGranaghan M., Ferraro R., Morganson S. and Hant B. Voltage notching interaction caused by large adjustable speed drives on distribution systems with low short circuit capacities. *IEEE Trans Power Delivery*. Vol. 11. No 3. July 1996.
7. Chyzhenko O.I. A method for improving the form of mains voltage under supply of controlled rectifiers. Patent of Ukraine. №117053.
8. Chyzhenko I.M., Rudenko V.S., Senko V.I. Fundamentals of converter technology. Moskva: Vysshaya shkola. 1974. 432 s.

Надійшла: 02.05.2022

Received: 02.05.2022