

ОСОБЛИВОСТІ ДЕКОМПОЗИЦІЇ БАГАТОРІВНЕВИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ ЗА УМОВИ ЗАДАНОГО ОБМЕЖЕННЯ ДІАПАЗОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

К.О. Липківський*, докт. техн. наук, А.Г. Можаровський**, канд. техн. наук.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: lypkivskyk@ukr.net ; AnatMozhrvsk@ukr.net

Узгодження вимог певних груп електротехнічних та електротехнологічних споживачів електроенергії з діючими умовами живлення вимагає у багатьох випадках використання засобів перетворювальної техніки. Чільне місце серед систем, призначених для цілеспрямованої зміни напруги живлення таких споживачів (регулювання, стабілізації), займають перетворювачі з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами або tap changing (smart) transformers, в яких застосовується дискретно-разове керування (discrete-time control), зокрема так звані багаторівневі випрямлячі змінного струму (БРВ). Під час синтезу БРВ головною проблемою є визначення оптимального закону секціонування вторинної обвитки його трансформатора. В роботі проаналізовано особливості декомпозиції БРВ на два функціонально тотожні блоки за умови заданого обмеження діапазону регулювання вихідної напруги та її відмінність від декомпозиції широкодіапазонних БРВ. Визначено апріорну багатоваріантність схемотехнічних рішень таких БРВ. Запропоновано нові БРВ з високою ефективністю використання напівпровідникових ключових елементів. Бібл. 15, рис. 7, табл. 3.

Ключові слова: багаторівневий випрямляч, трансформаторно-ключова виконавча структура, tap changing transformer, smart transformer, декомпозиція, багатоваріантність, ефективність використання ключових елементів.

Якість електроенергії (ЕЕ) в системах живлення електротехнічного та електротехнологічного обладнання далеко не завжди відповідає прийнятним нормам [1]. Згідно з діючим стандартом її параметри можуть коливатися/відхилятися від номінальних значень лише у деяких унормованих межах та, навіть, на деякий час (щоправда, теж унормований) виходити за них [2]. Проте, на практиці до цього додаються впливи втрат ЕЕ при транспортуванні та у лініях приєднання (особливо – "слабких"), віддаленість електроспоживачів, тощо [3]. Найгостріше проблема підтримання необхідної якості ЕЕ, зокрема стабільності рівня напруги, постає у локальних енергосистемах та системах з відновлюваними джерелами енергії (що є апріорі нестабільними), збільшення кількості та вагомості яких є сучасним трендом у світовій енергетиці [4, 5]. Вирішення цієї проблеми вимагає створення, вдосконалення та застосування різноманітних систем стабілізації напруги. Натомість, значна частина електротехнологічного обладнання внаслідок особливостей процесів, які в них реалізуються, потребує регулювання живлячої напруги в деяких, інколи в дуже широких межах.

В системах живлення споживачів змінного струму серед пристроїв, що виконують функцію необхідної цілеспрямованої зміни рівня вихідної напруги (регулювання, стабілізації) чільне місце займають енергоефективні перетворювачі з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами – ТКВС [1]. Це так звані tap changing transformers, які, зокрема, широко використовуються у інтерактивних джерелах гарантованого живлення – Line-Interactive UPS, які ще називають Smart UPS [6, 7, 8]. У структурах цього типу можлива реалізація множини робочих станів, що визначається необхідною точністю регулювання. Кожний стан характеризується відповідним коефіцієнтом передачі по напрузі, а перехід між станами відбувається шляхом дискретно-разового керування (discrete-time control [9]) напівпровідниковими ключовими елементами (переважно – тиристорами), завдяки чому у робочих станах ТКВС відсутні будь-які спотворення у вихідній напрузі та у вхідному струмі.

В системах живлення споживачів випрямленого струму функція зміни в разі необхідності рівня вихідної напруги реалізується або самим випрямлячем за рахунок застосування імпульсного регулювання керованими ключами (зокрема, фазового), або окремим перетворювачем рівня напруги змінного струму на вході нерегульованого випрямляча. У першому випадку і вихідна напруга, і вхідний струм мають спотворення, які змінюються в процесі регулювання, що вимагає встановлення відпові-

дних вхідних та вихідних фільтрів [10]. У другому – відбувається подвійне перетворення ЕЕ [11], що суттєво позначається на ефективності використання напівпровідникових ключових елементів.

Перспективним для цих систем живлення є застосування класу ТКВС, в яких виконання функцій як регулювання (шляхом формування потрібної множини станів системи), так і випрямлення напруги змінного струму покладено на одні й ті ж ключові елементи. Такі багаторівневі випрямлячі (БРВ) складаються з силового трансформатора Тр та певного масиву паралельно з'єднаних пар послідовно з'єднаних тиристорів (стійок), спільні точки яких приєднані до відповідних відводів секціонованої вторинної обвитки Тр [12]. Конфігурація БРВ не залежить від заданого діапазону регулювання вихідної напруги, проте оптимальні закони секціонування обвитки є різними для випадку широкодіапазонного регулювання, коли нижня межа напруги дорівнює нулю, та випадку з обмеженням діапазону, коли нижня межа за вимогами споживача має відмінне від нуля значення. В обох випадках видається доцільною декомпозиція БРВ на два нетотожних, але функціонально однакових блока, яка дає змогу досягти суттєвого підвищення ефективності використання ключових елементів (за рахунок мультиплікативності зв'язків станів блоків). Проте, ця процедура для обох випадків суттєво різниться.

Метою роботи є визначення особливостей декомпозиції багаторівневого випрямляча за умови заданого обмеження діапазону регулювання вихідної напруги та синтез схемотехнічних рішень БРВ, оптимальних за ефективністю використання напівпровідникових ключових елементів.

У попередніх роботах авторів, зокрема у [13], сформульовано основні положення щодо секціонування вторинної обвитки трансформатора БРВ. А саме. Щонайменше одна з секцій розраховується на напругу ΔU_0 , що відповідає кроку регулювання. Задля зручності подальшого дослідження саме по напрузі цієї секції й, відповідно, кількості її витків доцільно нормувати напруги та кількості витків інших секцій. Сумарне значення кількості витків всіх секцій повинно дорівнювати заданому діапазону регулювання напруги. Шкала J рівнів вихідної напруги має бути лінійною, без проміжків, тобто $U_{2(j+1)} = U_{2j} + \Delta U_0$ ($j = \overline{1, J}$). Виходячи з цього було

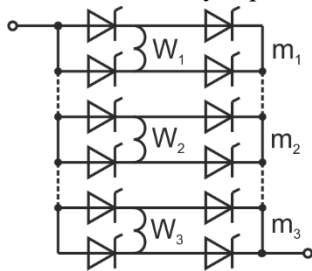


Рис. 1

доведено необхідність такого поділу вторинної обвитки Тр, за якого вона має три групи секцій, кожна з яких містить m_i однакових по кількості витків секцій W_i ($i = 1, 2, 3$). (Після прийнятого нормування маємо: $W_3^* = W_3/W_3 = 1$; $W_2^* = W_2/W_3$; $W_1^* = W_1/W_3$). Це відображено на рис. 1, де наведено конфігурацію БРВ у найбільш узагальненому вигляді (задля компактності без первинної обвитки Тр). За кількості стійок S у цій структурі загальна кількість секцій вторинної обвитки становить $M = m_1 + m_2 + m_3 = S - 1$.

Для випадку широкодіапазонного регулювання напруги (назвемо відповідний перетворювач БРВшд), у [13] було наведено й обґрунтовано оптимальний (з позиції забезпечення високої ефективності використання напівпровідникових ключів) закон секціонування вторинної обвитки Тр, який у даній роботі представлено у більш компактному та узагальненому вигляді (табл. 1). Кількість стійок

Таблиця 1

i	W_i^*	m_i
1	$0,5[S \pm 0,5(1 - (-1)^S)]$	1
2	$0,5[S \mp 0,5(1 - (-1)^S)] + 1$	$0,5[S \mp 0,5(1 - (-1)^S)] - 1$
3	1	$0,5[S \pm 0,5(1 - (-1)^S)] - 1$

таблиці формул впливає, що при виборі парної кількості стійок можливим є один варіант оптимального підбору кількості секцій у групах та витків у секціях, а самі вирази для їхнього розрахунку значно спрощуються. За непарної кількості стійок вирази теж спрощуються, проте можливими при цьому стають вже два варіанти секціонування обвитки, які є оптимальними, тобто однаковими за ефективністю використання ключів.

У [15] доведено можливість подальшого збільшення зазначеного критерія якості БРВшд шляхом його декомпозиції (поділу на два блоки), сутність якої полягає в синтезі структури (визначенні оптимального співвідношення кількості стійок у кожному блоці, взаємного розташування секцій між блоками) та синтезі параметрів вторинної обвитки Тр (визначенні оптимальної кількості секцій у групах та кількості витків у секціях). За збереження загальної кількості стійок S блоки мають відповідно S_1 та S_2 стійок, що розраховуються за формулою $S_k = 0,5[S \pm (1 - (-1)^{S_k})]$, де $k = 1, 2$. Кожен блок може працювати у J_i робочих станах, кількість яких визначається S_i . Один з блоків (незалежно від кількості стійок) містить секції з меншою, а другий – з більшою кількістю витків. Виткові співвідношення секцій

S визначає не лише параметри секцій (m_i, W_i), а й загальна кількість можливих станів структури $J = 0,25[(S+2)^2 - 0,5(1 - (-1)^S)] - 3$. З цього виразу маємо нерівність, за якою обирається кількість стійок, необхідних для реалізації заданої кількості станів, $S \geq 2(-1 + \sqrt{J+3})$. З наведених у

цій у кожному блоці обираються за законом (табл. 1), проте кількості витків у секціях другого блоку мають бути у J_1+1 більшими, тобто загальна кількість станів (рівнів вихідної напруги) $J=J_1+J_2(J_1+1)$.

Декомпозицію БРВшд розглянемо на прикладі перетворювача з 9 стійками, тобто з 8 секціями обвитки ($m_1=1, m_2=3, m_3=4$), який може функціонувати у 28 станах з відповідними коефіцієнтами передачі по напрузі (з врахуванням нульового рівня). На рис. 2 зображено його структуру та наведено відносні значення кількостей витків у секціях трьох груп для двох можливих рівноцінних варіантів, один з яких – у дужках. (Зауважимо, що наявність різних варіантів можна відобразити і таким чином: $W_3=1, W_2=6(5), W_1=5(4)$). Проте, на нашу думку, використання ілюстративного матеріалу є більш наочним). Синтезований двоблоковий БРВшд (рис. 3) за $S_f=5$ забезпечує $J_f=9$; за $S_f=4$ забезпечує $J_f=6$, тобто $J=6+9(6+1)=69$. Його можна реалізувати у чотирьох рівноцінних за кількістю робочих станів варіантах – з врахуванням нульового рівня $J=70$, що у 2,5 разу більше, ніж до декомпозиції.

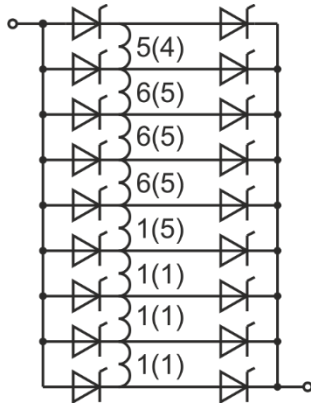


Рис. 2

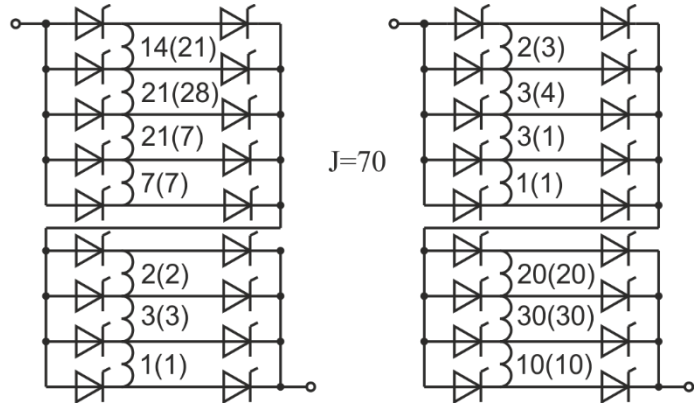


Рис. 3

Аналогічно можна виконати декомпозицію у випадку побудови БРВ за необхідності регулювання напруги в обмеженому діапазоні (або під час реалізації стабілізації вихідної напруги). Основною відмінністю такого перетворювача – назвемо його БРВод – є те, що у разі секціонування обвитки у другій групі буде одна секція ($m_2=1$), кількість витків якої ($W_2=W_0$) визначається мінімальною вихідною напругою. Для цього перетворювача з метою забезпечення високої ефективності використання ключів довелося запропонувати інший закон секціонування, який відображено у табл. 2. При цьому

Таблиця 2

i	W_i^*	m_i
1	$0,5[S \mp 0,5(1-(-1)^S)]$	1
2	W_0^*	$0,5[S \pm 0,5(1-(-1)^S)]-1$
3	1	$0,5[S \mp 0,5(1-(-1)^S)]-1$

по іншому визначається й залежність загальної кількості станів структури від кількості стійок $J=0,25[S^2-0,5(1-(-1)^S)]$ та зворотна залежність $S \geq 2\sqrt{J}$. Тут, як і раніше, є різниця у разі секціонування обвитки за парної та непарної кількості стійок: у першому випадку можливим є один

варіант оптимального вибору секцій у групах та витків у секціях, а у другому – два однакових за ефективністю використання ключів варіанта.

На рис. 4 наведено структуру такого перетворювача з тією ж кількістю стійок $S=9$, яка може працювати у 20-ти станах, що значно менше, ніж у БРВшд. Це не слід трактувати як якийсь недолік, це наслідок необхідності введення "неформатної" секції W_0 , яка практично "витіснила" другу, найбільш вагому (за кількістю витків) групу регульованих секцій, що призвело до збільшення кількості менш вагомих секцій першої групи (у БРВшд $m_1=1$). Таке положення лише відображає специфіку функціонування БРВшд. Звуження за вимогою споживача діапазону регулювання напруги у разі забезпечення незмінної точності регулювання зменшує вимоги щодо кількості станів системи та, як наслідок, веде до певного зменшення необхідної кількості ключів. До того ж слід додати, що за тієї ж структури, що й у БРВшд, тут виникає можливість змінити деякі елементи структури, а саме використати замість тиристорів менш вартісні діоди у двох стійках, до середніх точок яких приєднана секція W_0 . За відсутності керуючих сигналів на тиристорах, що залишилися, споживач буде живитися напругою найнижчого рівня, а у разі вмикання будь-якої тири-

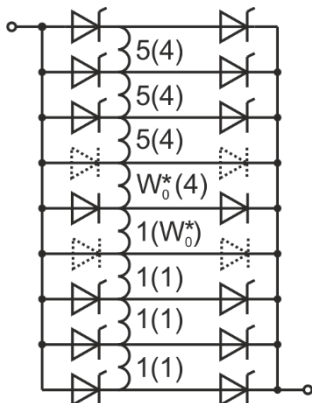


Рис. 4

торної стійки найближча до неї діодна стійка закривається природнім шляхом, і відбувається збільшення кількості задіяних витків, тобто необхідна зміна стану структури та напруги. При знятті імпульсів управління з діючих тиристорів вони, згідно з принципом дискретно-разового керування, зачиняються, та у роботу входить відповідна діодна стійка й до споживача знову подається мінімальна напруга до надходження імпульсів управління на нову пару тиристорів.

У разі декомпозиції БРВод синтез двоблокової структури відрізняється тим, що для блока, в якому є тільки регулювальні секції, кількості витків визначаються за законом табл. 1, а кількості витків у блоці, де W_0 , – за законом табл. 2. При цьому за однакової кількості S отримуємо 4 рівноцінних варіанти структури, де W_0 розміщена у блоці з більшою кількістю стійок (рис. 5), та 4 рівноцінних варіанти – де W_0 у блоці з меншою кількістю стійок (рис. 6). У другому випадку кількість станів двоблокового БРВод дорівнює 40, а у першому – 42, тобто розміщення W_0 саме у блоці з більшою S_j дає змогу отримати оптимальні варіанти побудови синтезованої структури БРВод зі збільшеною у 2,1 разу ($42/20=2,1$) ефективністю використання напівпровідникових ключових елементів. (Зауважимо, що на розміщення регулювальних секцій з більшою або меншою кількістю витків наявність або відсутність обвитки W_0 не накладає обмежень).

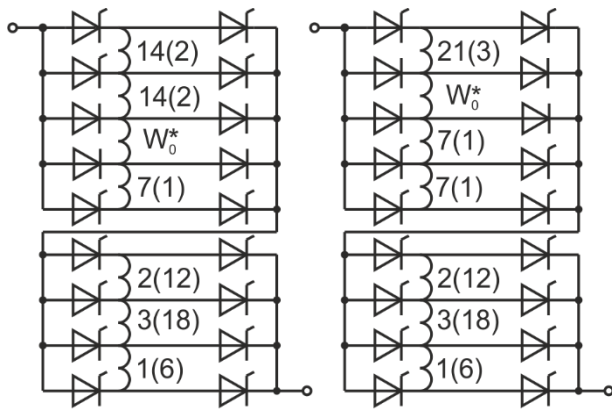


Рис. 5

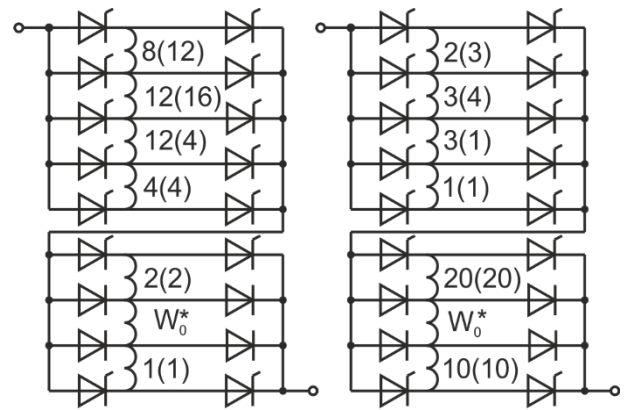


Рис. 6

Задля узагальнюючої оцінки особливостей декомпозиції БРВ з метою забезпечення високої ефективності використання ключових елементів за широкого та обмеженого діапазонах регулювання вихідної напруги, було розглянуто ще один двоблоковий БРВод з загальною кількістю стійок $S=10$ ($S_1=S_2=5$), який може працювати в одному з 60-ти робочих станів з відповідними коефіцієнтами передачі по напрузі. Згідно з прийнятими законами секціонування (див. табл. 1, табл. 2) було визначено, що у цьому випадку можливими є 8 варіантів оптимальних рішень. У табл. 3 наведено отримані в

Таблиця 3

i	1	2	3	4	5	6	7	8
W_{1i}	2	2	20	20	3	3	30	30
	2	2	20	20	W_0^*	W_0^*	W_0^*	W_0^*
	W_0^*	W_0^*	W_0^*	W_0^*	1	1	10	10
	1	1	10	10	1	1	10	10
W_{2i}	12	18	2	3	12	18	2	3
	18	24	3	4	18	24	3	4
	18	6	3	1	18	6	3	1
	6	6	1	1	6	6	1	1

результаті параметричного синтезу відносні значення кількостей витків у регулювальних секціях обвиток обох блоків W_{1i} , W_{2i} для всіх 8-ми варіантів. (Зауважимо, що ця третя форма подання інформації щодо секціонування обвитки Tr є одночасно компактною та достатньо наочною). Аналіз масиву досліджених схематичних рішень виконавчої структури БРВ свідчить, що кількість оптимальних варіантів залежить не від складності перетворювача (тобто кількості пар ключів), а від їхньої парності чи непарності у отриманих після декомпозиції блоках. Так у БРВод за парних значень S_1 та S_2 оптимальних варіантів – 2, за парне S_1 та непарне S_2 (або навпаки) таких варіантів – 4, а за обох непарних S_1 та S_2 – 8. У БРВшд оптимальних варіантів вдвічі менше – відповідно 1, 2, 4. Ці цифри наведено лише як доказ наявності певних особливостей за регулювання вихідної напруги БРВ в широкому або обмеженому діапазоні, бо для реалізації ефективного перетворювача достатньо визначити та обрати лише один з множини варіантів оптимальний закон секціонування обвитки Tr .

Наслідком переходу (як було обумовлено раніше – за незмінного значення S) від одноблокового БРВ з кількістю станів J_1 до двоблокового БРВ з загальною кількістю станів J_2 , є очікуване зростання коефіцієнту ефективності використання напівпровідникових ключових елементів $K_{e1}=J_1/N$ до $K_{e2}=J_2/N$. Задля оцінки результатів виконаної операції введемо коефіцієнт K_{e0} , що відповідає ефективній декомпозиції, $K_{e0}=K_{e2}/K_{e1}=J_2/J_1$. Визначені теоретичні положення щодо вдосконалення багаторівневих випрямлячів справедливі для виконавчих структур будь-якої складності. Проте перетворювачі цього класу не призначені для прецизійного регулювання, тому у більшості випадків можна використовувати схемотехнічні рішення з 7-10 парами напівпровідникових приладів, що дає змогу реалізувати 20-100 (БРВшд) або 15-60 (БРВод) робочих станів. На рис. 7 наведено залежності $K_{e0}=f(S)$ для БРВшд (суцільні лінії) та БРВод (пунктирні лінії). Як видно, у першому випадку введений коефіцієнт має очікувано більше значення, а його залежність від S є більш виразною. В обох випадках за незмінності S досягається значне (у 1,5-2,5 разу) зростання кількості станів структури,

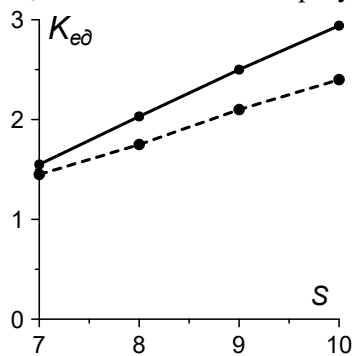


Рис. 7

що реалізуються, та, як наслідок, збільшення точності регулювання рівня вихідної напруги.

Висновки. У роботі визначено особливості вдосконалення багаторівневих випрямлячів з широким або обмеженим діапазонами регулювання вихідної напруги шляхом декомпозиції виконавчої структури (поділу на два блоки), що, внаслідок мультиплікативності зв'язку їхніх робочих станів, забезпечує суттєве збільшення кількості коефіцієнтів передачі по напрузі. Таким чином, виокремлено та досліджено ще один з аспектів багатоваріантності трансформаторно-ключових виконавчих структур, який дає змогу синтезувати масиви параметрів секцій обвитки трансформуючого елемента БРВ, оптимальних за ефективністю використання ключових напівпровідникових приладів.

Роботу виконано в рамках бюджетної програми за темою "Барер-2", державний реєстраційний номер 0117U007714(КПКВК 6541030).

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.
2. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. ДСТУ EN 50160:2014. Київ: УкрДНЦ, 2014, 32 с.
3. Гриб О.Г., Сокол Е.И., Жаркін А.Ф., Васильченко В.И., Тесік Ю.Ф. Качество электрической энергии. Харків: ПП Граф-Ікс, 2014. 244 с.
4. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в слабкі електричні мережі. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 25–26.
5. Statistics Time Series. URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (дата звернення 11.02.2022)
6. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J.D., Vandeveldel L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT - Europe 2013)*, IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
7. Trentini Andrea. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, 2018.
8. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
9. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11–20.
10. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. US Patent 9800161B2. Oct. 27, 2017.
11. Timothy F. Glennon, Byron R. Mehl. Regulated AC/DC converter. US Patent 4739466. Apr. 19, 1988.
12. Липківський К.О., Мажаровський А.Г. Особливості процесів зміни вихідної напруги регуляторів спрямованого струму, побудованих на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 3. С. 42–46.
13. Липківський К.О., Мажаровський А.Г. Особливості секціонування обвитки трансформуючого елемента трансформаторно-ключової виконавчої структури у вольтододавчому каналі системи живлення постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 6. С. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.025>

14. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Вдосконалення багаторівневого випрямляча у складі вольто-додавчого каналу системи живлення постійного струму шляхом декомпозиції його елементів. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 2. С. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.035>

15. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Багаторівневий регулятор величини постійної напруги. Патент на корисну модель №150214, Україна. 2006.

FEATURES OF DECOMPOSITION OF MULTI-LEVEL RECTIFIERS UNDER CONDITIONS OF THE SPECIFIC LIMIT OF THE RANGE OF OUTPUT VOLTAGE REGULATION

K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: lypkivskyk@ukr.net ; AnatMozhrvsk@ukr.net

Harmonization of the requirements of certain groups of electrical and electrotechnological consumers of electricity with the current supply conditions requires in many cases the use of converters. Prominent among the systems designed to purposefully change the supply voltage of such consumers (regulation, stabilization) are converters with transformer-and-switches executive structure or tap changing (smart) transformers, which use discrete-time control, in particular so-called multi-level AC rectifiers (MLR). In the synthesis of MLR the main problem is to determine the optimal law of sectioning of the secondary envelope of its transformer. The paper analyzes the features of MLR decomposition into two functionally identical blocks under the given limitation of the output voltage control range and its difference from the decomposition of wide-range MLRs. The a priori variety of circuit technical solutions of such MLRs is determined. New MLRs with high efficiency of semiconductor switch elements use are offered.

Key words: multilevel rectifier, transformer-and-switches executive structure, tap changing transformer, smart transformer, decomposition, multivariate, efficiency of use of switch elements. References 15, figures 7, tables 3.

1. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).

2. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. EN 50160. Kyiv: UkrNDNTs, 2014, 32 p. (Ukr)

3. Gryb O.G., Sokol E.I., Zharkin A.F., Vasylychenko V.I., Tesyk Y.F. Quality of electrical energy. Kharkiv: PE Graf-X, 2014. 244 p. (Rus).

4. Kirilenko O.V., Pavlovsky V.V., Lukanenko L.M., Trach I.V. Problems of integration of renewable energy sources into weak electric grids. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 25–26. (Ukr)

5. Statistics Time Series. URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (accessed at 11.02.2022)

6. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J.D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT - Europe 2013)*, IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>

7. Trentini, Andrea. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, 2018

8. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>

9. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter. 2007. Vol. 19. № 4. Pp. 11–20.

10. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. US Patent 9800161B2. Oct. 27, 2017.

11. Timothy F. Glennon, Byron R. Mehl. Regulated AC/DC converter. US Patent 4739466. Apr. 19, 1988.

12. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Features of the processes of change of output voltage regulators rectified current built of transformer-and-switches executive structure. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2014. No 3. Pp. 42–46. (Ukr)

13. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Features of sectioning the turns of the transforming element of the transformer-key actuating structure in the boost channel of the DC power system. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 25–31. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.025> .

14. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G., Improvement of a multilevel rectifier as part of a booster channel of a DC power supply system by decomposition of its elements. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2021. No 2. Pp. 35–41. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.035> .

15. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Multilevel DC voltage regulator. Patent UA №150214, 2006. (Ukr)

Надійшла 22.02.2022