

ОСОБЛИВОСТІ СЕКЦІОНУВАННЯ ОБВИТКИ ТРАНСФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ У ВОЛЬТОДОДАВЧОМУ КАНАЛІ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

К.О. Липківський*, докт. техн. наук, А.Г. Мажаровський**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

Одним з дієвих шляхів забезпечення унормованої роботи споживача електроенергії за нестабільного первинного джерела живлення є організація відповідного вольтододавчого каналу. В системі з джерелом постійного струму вольтододавання реалізується введенням послідовно з навантаженням випрямного напівпровідниково-го моста, у діагональ якого подається енергія змінного струму, рівень напруги якої цілеспрямовано змінюється відповідним перетворювачем з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою (ТКВС). З метою досягнення високої ефективності використання ключових елементів ТКВС запропоновано покласти функції випрямлення та регулювання напруги на специфічний клас ТКВС – багаторівневий випрямляч, що складається з трансформатора та кінцевої множини паралельно з'єднаних пар послідовно з'єднаних тиристорів, спільні точки яких приєднуються до відповідних відводів секціонованої вторинної обвитки трансформатора. За дискретно-разового керування тиристорами реалізується необхідне регулювання рівнів напруги, що додається. Лінійність шкали цих рівнів забезпечується завдяки використанню запропонованого закону секціонування обвитки трансформатора. Для цієї системи електроживлення характерні малі втрати енергії у напівпровідникових елементах (одночасно працюють лише два тиристора), апріорно неможливо виникнення аварійних ситуацій під час переходів від одного рівня до іншого. Бібл. 14, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, системи живлення постійного струму, вольтододавчий канал, багаторівневий випрямляч, закон секціонування обвитки.

В системах електропостачання не завжди забезпечується необхідна узгодженість вимог конкретного споживача електроенергії (зокрема, щодо стабільності рівня напруги) з реальними умовами живлення. Якщо споживач приєднується до загальної електромережі (енергосистеми), ця неузгодженість є, переважно, наслідком втрат енергії у лінії з'єднання його з мережею, а в разі локальної системи живлення – нестабільної роботи автономного джерела енергії. Особливу гостроту ця проблема набуває у системах з відновлюваними джерелами енергії – ВДЕ (зокрема, сонячними та вітроустановками), які відзначаються практичною невичерпністю та екологічною чистотою, що сприяє поліпшенню екологічного стану і не призводить до зміни енергетичного балансу на планеті [1]. Останні десятиріччя відбувається стрімкий розвиток та розширення застосування різних типів ВДЕ [2]. Проте, апріорна залежність їхньої роботи від метеорологічних умов довкілля вимагає задля забезпечення унормованого функціонування системи енергопостачання застосування в ній певних технічних засобів, а саме – встановлення між споживачем і джерелами енергії відповідних узгоджувачих пристроїв (restorer, compensator [3, 4]), зокрема регуляторів та стабілізаторів напруги.

Найбільш доцільним вирішенням проблеми є організація в системі енергопостачання ВДЕ вольтододавчого каналу (ВДК), який живиться від стороннього джерела, або від "свого" ВДЕ (у разі незначного його "просідання") чи введеного у систему накопичувача енергії (аккумуляторної батареї), що може заряджатися від цього ж ВДЕ в періоди генерування "надлишкової" (для даного споживача) енергії та віддавати йому накопичене за необхідності. Побудова ВДК в системах змінного [5, 6] та постійного струмів [7] відрізняється способом введення додаткової енергії: у перших – це включення послідовно з навантаженням вторинної обвитки вольтододавчого трансформатора, а у других ця обвитка вмикається у діагональ діодного випрямляча, інша діагональ якого увімкнена в коло силового струму.

Прикладом останнього є нещодавно запатентована система енергопостачання з ВДЕ [8], блок-схему якого наведено на рис. 1. У вольтододавчому каналі системи з інвертором (зазвичай, високочастотного), що живиться безпосередньо від ВДЕ з виходом на постійному струмі, енергія змінного струму передається на перетворювач напруги з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою

– ТКВС [9], за західною термінологією – smart transformer [10]. (Відсутність зазначеного вище накопичувача та схеми інвертора свідчать, можна припустити, що автори основну увагу зосередили саме на вихідному каскаді ВДК). ТКВС складається з трансформатора (Тр), що має секціоновані обвитки, та двох напівпровідникових комутаторів: на первинній стороні трансформатора – з трьох пар зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів, а на вторинній – з двох аналогічних пар. За дискретно-разового керування (discrete time control [11]) цими тиристорами відповідною зміною – в разі потреби – коефіцієнтів трансформації Тр забезпечується функціонування ТКВС у 6 (3×2) штатних станах (режимах). Таким чином, рівень напруги змінного струму, що подається у діагональ діодного моста, можна цілеспрямовано змінювати у діапазоні $\Delta U = 6\Delta U_1$, де ΔU_1 – крок регулювання. Ця напруга після випрямлення додається до напруги генератора за її зниження, тобто досягається певне нівелювання відхилень вихідної напруги системи електропостачання з ВДЕ від номінального значення.

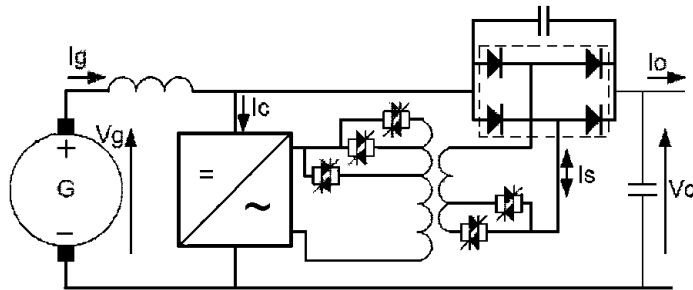


Рис. 1

За наявності низки позитивних якостей схемного рішення з [8] (простота побудови та керування, висока перевантажувальна здатність, відсутність високочастотних завад) не можна не відзначити й певні недоліки. У першу чергу, це невисоке значення коефіцієнта ефективності використання напівпровідникових приладів, який визначається співвідношенням необхідної (заданої) кількості рівнів напруги, що додається, (кількості станів ТКВС – J) та необхідної для цього кількості напівпровідникових приладів (НПП) – F [12]. У [8] задіяно п'ять пар тиристорів ($N=5 \times 2=10$, де N – кількість тиристорів) та чотири діоди, тобто маємо $K_e = J/F = 6/14 = 0,435$, що не завжди може бути прийнятним. Крім того, тут одночасно працює чотири НПП (два тиристори та два діоди), що негативно позначається на загальних втратах енергії, існує ймовірність виникнення короткозамкнених витків в обвитці Тр за неузгодженого керування тиристорами у випадку, коли будуть одночасно увімкнені тиристори, приєднані до різних відводів Тр будь-якого з комутаторів.

У роботі [13] було запропоновано функції цілеспрямованої зміни рівня додаткової напруги та її випрямлення покласти на так званий багаторівневий випрямляч [14], який реалізує вольтододавання у тому ж діапазоні, але має лише вісім тиристорів та позбавлений діодів, тобто $K_e = 6/8 = 0,75$, що у 1,75 рази вище ніж у [8]. У такому випадку одночасно працює лише два напівпровідникових прилади, а будь-яка неузгодженість керування ними не призводить до аварійної ситуації. У [13] також відзначено теоретичну можливість варіювання (у бік збільшення) глибини регулювання вихідної напруги за заданого кроку зміни її рівня, або ж зменшення цього кроку (зменшення похибки) за заданої глибини шляхом збільшення кількості паралельно з'єднаних стійок S (поєднано з'єднаних пар тиристорів) випрямляча та відповідного збільшення кількості секцій вихідної обвитки Тр. Проте реалізація цього, аби уникнути простого недостатньо ефективного лінійного зростання J зі зростанням N , вимагає вирішення питання вибору більш прийняттого закону секціонування обвитки Тр.

Метою роботи є обґрунтування доцільності запропонованого закону секціонування обвитки трансформуючого елементу трансформаторно-ключової виконавчої структури у вольтододавчому каналі системи електроживлення постійного струму з позиції підвищення ефективності використання ключових елементів ТКВС – напівпровідникових приладів (тиристорів).

На рис. 2 зображено перетворювач напруги з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою в узагальненому вигляді – з S стійками (з $N=2S$ тиристорами) та M секціями вторинної обвитки Тр ($M=S-1$). Під час вмикання будь-якої однієї стійки відбувається пряма (безпосередня) передача (т.зв. "транзит") енергії від генератора постійного струму ВДЕ до споживача. Вмикання двох будь-яких стійок вводить у дію секцію або групу секцій, приєднаних до їхніх спільних точок. Варіювання одночасно працюючих пар стійок дає змогу в разі потреби цілеспрямовано змінювати рівень випрямленої напруги, що додається, до напруги генератора ВДЕ. (Слід ще раз підкреслити, що за випадкового одночасного відкриття тиристорів трьох чи більше стійок відбудеться лише незапланована короткочасна зміна рівня напруги в межах діапазону її регулювання). Весь діапазон регулювання напруги ΔU , що додається, складається з J однакових піддіапазонів – $\Delta U = J\Delta U_1$.

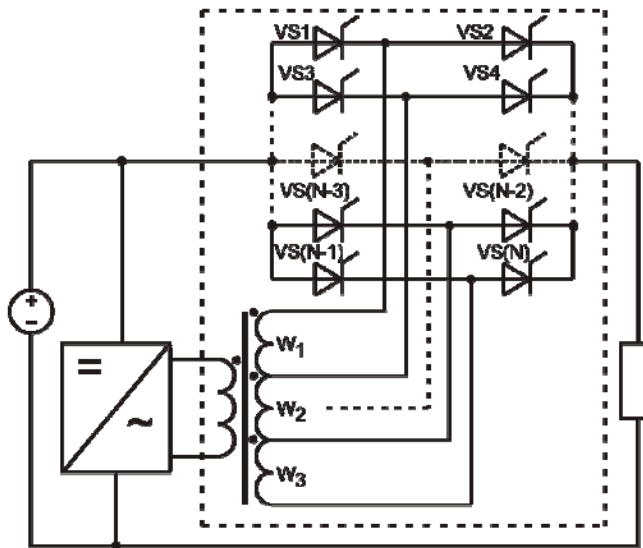


Рис. 2

ницю, тобто доцільно виконувати секції різними (з врахуванням (п.п. 1, 2), з різними кількостями витків, розрахованими на струм навантаження).

Аналіз множини варіантів секціонування обвитки T_r було розпочато зі згаданого вище простого випадку – ТКВС, що має чотири стійки (8 тиристорів), три секції ($M=3$) та забезпечує реалізацію шести рівнів напруги, що додається ($J=6$). У ній задля виконання умов п.п. 1, 2 було обрано такі співвідношення витків та розміщення трьох секцій $W_a:W_b:W_c = W_a^*:W_b^*:W_c^*=2:3:1$, де $W_a^*=W_a/W_c, W_b^*=W_b/W_c, W_c^*=W_c/W_c=1$ (у двох інших теоретично можливих варіантах розміщення секцій – 3:2:1 або 2:1:3 – "випадають", відповідно, 4-й та 5-й рівень). У разі збільшення кількості стійок до 5 (секцій – до 4) однакової кращий результат – $J=9$ показали два варіанти секціонування – $W_a^*:W_b^*:W_c^*:W_d^*=2:3:3:1$ (тут $W_c^*=W_d^*=3$) та 3:4:1:1 (тут $W_c^*=W_d^*=1$).

Результати подальшого покрокового збільшення кількості стійок та секцій обвитки й поступового ускладнення задачі згідно з методом індукції (одержання загального висновку на основі аналізу окремих фактів) ілюструють дані, наведені у табл. 1. З їхнього аналізу випливає, що у разі секціонування:

Таблиця 1

N	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26					
S	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					
M	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
W_1^*	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7
W_2^*	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8
W_3^*	1	3	1	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8
	-	1	1	1	4	1	5	5	6	6	6	7	7	7	8
	-	-	-	1	1	1	1	5	1	6	6	7	7	7	8
	-	-	-	-	1	1	1	1	1	6	1	7	7	8	
	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	7	1	
	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	
	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	
J	6	9	13	17	22	27	33	39	46	53					

m_2) та W_1 , кількість витків у якій дорівнює різниці витків W_2 та W_3 (така секція тільки одна, тобто $m_1=1$);

Під час синтезу закону секціонування вихідної обвитки трансформуючого елемента ТКВС виходимо з таких міркувань.

1. Щонайменше одна з секцій розраховується на напругу, що відповідає кроку регулювання. Задля зручності аналізу саме по напрузі на цій секції й відповідно кількості її витків нормуються напруги та кількості витків інших секцій.

2. Сумарне значення напруг всіх секцій повинно дорівнювати діапазону регулювання. Шкала J рівнів напруги, що додається, повинна бути лінійною, тобто $\Delta U_{j+1}=\Delta U_j+\Delta U_0$ ($j=1, (J-1)$).

3. За однаковості за витками всіх секцій ефективність використання ключових напівпровідникових елементів ТКВС – найнижча: у разі додавання однієї стійки тиристорів, (i , відповідно, однієї секції) кількість рівнів зростає на одиницю.

вання:

– кількість можливих варіантів зростає за збільшенням кількості тиристорів випрямляча, а кількість прийнятних (оптимальних з точки зору рівня ефективності використання напівпровідникових приладів) залишається незмінною – один варіант для парної кількості стійок та два – для непарної кількості стійок;

– можна обмежитися тільки трьома типами секцій: W_3 з мінімальною кількістю витків, що визначається напругою кроку регулювання (кількість таких секцій позначено через m_3), W_2 з максимальною кількістю витків (їхню кількість позначено через

– за парного значення кількості стійок завжди чисельно $W_2^* = S/2$, а за непарного відносна "вага" першої секції обирається такою самою, як у однієї з "дотичних" парних – або як у попередньої $(S-1)$ парної – позначимо це як варіант I, або як у наступної $(S+1)$ парної – варіант II;

– між кількістю стійок S ($S=2N$), кількістю секцій M ($M=m_1+m_2+m_3$) та кількістю J можливих рівнів напруги, що додається (кількість робочих станів системи), існують певні взаємозалежності, які задля узагальнення підходу до секціонування вторинної обвитки Тр у такій ТКВС доцільно визначити та представити у аналітичній формі.

Аналіз вже перших п'яти кроків варіювання кількості стійок ($S=4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$) дав змогу сформулювати емпіричні залежності параметрів секцій (тобто закон секціонування обвитки) – $W_i^* = f(S)$, $m_i = f(S)$ та кількості рівнів $J = f(S)$, що зведені у табл. 2. Ці залежності є різними для двох варіантів (I та

II) вибору секціонування обвитки за непарної кількості стійок, проте залежність $J = \sum_{i=1}^3 m_i W_i = f(S)$ є

Таблиця 2

i	S – парне + I варіант S непарних			S – парне + II варіант S непарних		
	m_i	W_i^*	$m_i W_i^*$	$m_i W_i^*$	W_i^*	m_i
1	1	$\frac{2S-1+(-1)^s}{4}$	$\frac{2S-1+(-1)^s}{4}$	$\frac{2S+1-(-1)^s}{4}$	$\frac{2S+1-(-1)^s}{4}$	1
2	$\frac{2S-3-(-1)^s}{4}$	$\frac{2S+3-(-1)^s}{4}$	$\frac{2S^2-5-3(-1)^s}{8}$	$\frac{2S^2-13+5(-1)^s}{8}$	$\frac{2S+5-(-1)^s}{4}$	$\frac{2S-5+(-1)^s}{4}$
3	$\frac{2S-5+(-1)^s}{4}$	1	$\frac{2S-5+(-1)^s}{4}$	$\frac{2S-3-(-1)^s}{4}$	1	$\frac{2S-3-(-1)^s}{4}$
J	$\sum_{i=1}^3 m_i W_i^* = \frac{2(S+2)^2 - 25 + (-1)^s}{8}$					

однаковою для обох варіантів. У цьому разі похибка встановлення рівня напруги ΔU_n дорівнює половині напруги кроку регулювання

$$\Delta U_n = \frac{\Delta U_1}{2} = \frac{\Delta U}{2J} = \frac{4\Delta U}{2(S+2)^2 - 25 + (-1)^s}. \quad (1)$$

З використанням запропонованого закону секціонування вихідної обвитки Тр цього типу ТКВС було визначено конкретні параметри секцій за будь-якого подальшого – в разі потреби – збільшення кількості секцій випрямляча (у табл. 1 наведено дані до $S=13$ з $J=53$). Хоча зазвичай (зокрема, й у іноземних патентах та публікаціях) не вводяться обмеження на кількість напівпровідникових приладів у пристрої, на практиці переважно достатньо залучення 20-30 тиристорів, що дає змогу в нашому випадку цілеспрямовано змінювати рівень напруги, яка додається, з похибкою $\pm(1,5...0,725)\%$ від повного діапазону її регулювання.

Коефіцієнт ефективності використання напівпровідникових приладів ТКВС згідно табл. 2 (переходимо від кількості стійок S до кількості тиристорів N) дорівнює

$$K_e = \frac{J}{N} = \frac{(N+4)^2 - 50 + 2(-1)^{0,5N}}{16N}. \quad (2)$$

Графіки на рис. 3 наочно підтверджують задекларовану раніше суттєву перевагу за цим показником розглянутої в цій статті узагальненої ТКВС у складі вольтододавчого каналу системи електроживлення постійного струму. Крива 1 відповідає значенням K_e , отриманим за формулою (2), а криві 2 та 3 – значенням K_e для технічного рішення [8]; крива 2 враховує наявність діодів, тобто $K_e = f(F)$, а крива 3 не враховує, тобто $K_e = f(N)$. Дві останні криві побудовані для доцільних співвідношень тиристорів у вхідному та вихідному контурах Тр – $N_1:N_2 = 6:4; 6:6; 8:6; 8:8; 10:8; 10:10; 12:10; 12:12; 14:12$. Задля конкретики на графіку точками T_1, T_2, T_3 позначено варіант реалізації 9 рівнів напруги: для T_1 маємо $N=10$, тобто $K_{e1}=0,9$; для $T_2 - F=16 > 10$, тобто $K_{e2}=0,435 \ll K_{e1}$; для $T_3 - N=12 > 10$, тобто $K_{e3}=0,75 < K_{e1}$.

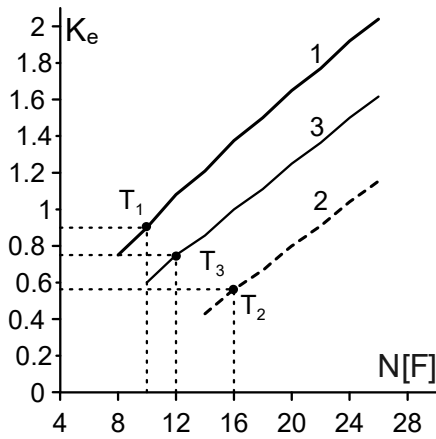


Рис. 3

До особливостей запропонованого секціонування можна віднести те, що у разі переходу від структури з S стійками до структури з $(S+1)$ стійками зростання кількості рівнів напруги залежить від того, парним чи непарним було початкове значення S . Якщо S парне (4, 6, 8...), то $J_{S+1}-J_S=(S+2)/2$, якщо непарне (5, 7, 9...), то $J_{S+1}-J_S=(S+3)/2$. А от різниця $(J_{S+1}-J_S)$ незалежно від того, парне чи непарне S , однакова й дорівнює $(S+3)$.

Ще одна особливість полягає у тому, що будь-яка реалізація ТКВС буде відзначатися певною надлишковістю її можливостей. Формули у табл. 2 дають змогу визначити (розрахувати) параметри секцій ("вагу" – нормоване значення, кількість, розміщення у складі обвитки) для будь-якої кількості тиристорних стійок S у багаторівневому випрямлячі, а також значення максимально можливої кількості рівнів напруги, що можна забезпечити структурою з такою кількістю стійок S . На практиці зазвичай задаються діапазоном регулювання напруги, що додається ΔU_3 , та напруга кроку регулювання $\Delta U_{1\zeta}$, яку доцільно нормувати по $\Delta U_3 - \Delta U_{1\zeta}^* = \Delta U_{1\zeta} / \Delta U_3$. При цьому необхідна кількість рівнів $J_n = 1 / \Delta U_{1\zeta}^*$. Внаслідок дискретності залежності $J=f(S)$ треба обирати фактичне значення кількості стійок S_ϕ таким чином, аби $J_\phi \geq J_n$. З рівняння (1) знаходимо

$$S_\phi \geq 2(\sqrt{J_i + 3} - 1). \quad (2)$$

У табл. 3 наведено кілька прикладів визначення S_ϕ , J_ϕ та $\Delta U_{1\zeta}^*$ (фактичний нормований крок регулювання), які ілюструють цю особливість. Як видно, надлишковість, що виникає за практичної реалізації секціонування обвитки ТР, не призводить до суттєвого збільшення кількості стійок. Деяке зменшення фактичного кроку зміни напруги дає в результаті відповідне зменшення фактичної похибки регулювання.

(Слід зауважити, що подібна надлишковість притаманна й іншим варіантам побудови ТКВС. Так у схемному рішенні [8] ряд рівнів, що визначається законом $J=N_1N_2$, буде для $N=N_1+N_2=10 \div 26$ мати такий вигляд $J=6, 9, 12, 16, 20, 25, 30, 36, 42$).

Таким чином, запропоноване суміщення функцій регулювання та випрямлення напруги у трансформаторно-ключовій виконавчій структурі вихідного каскаду вольтододавчого каналу системи живлення постійного струму та оригінальний закон секціонування вторинної обвитки трансформатора ТКВС дали змогу суттєво зменшити кількість напівпровідникових приладів задля досягнення потрібної кількості рівнів напруги, що додається, вдвічі зменшити втрати у цих приладах та виключити можливість виникнення аварійної ситуації через їхню комутацію.

Таблиця 3

$\Delta U_{1\zeta}^*$	J_n	$2(\sqrt{J_i + 3} - 1)$	S_ϕ	J_ϕ	$\Delta U_{1\zeta}^*$	$\Delta U_{1\zeta}^* / \Delta U_3$
10	10	5,2	6	13	7,7	0,77
5	20	7,8	8	22	4,55	0,91
3,3	30	9,5	10	33	3,03	0,92
2,5	40	11,1	12	46	2,17	0,87
2,0	50	12,6	13	53	1,88	0,94

Таким чином, запропоноване суміщення функцій регулювання та випрямлення напруги у трансформаторно-ключовій виконавчій структурі вихідного каскаду вольтододавчого каналу системи живлення постійного струму та оригінальний закон секціонування вторинної обвитки трансформатора ТКВС дали змогу суттєво зменшити кількість напівпровідникових приладів задля досягнення потрібної кількості рівнів напруги, що додається, вдвічі зменшити втрати у цих приладах та виключити можливість виникнення аварійної ситуації через їхню комутацію.

Роботу виконано за НДР "Бар'єр-2" (Розділ "Розвиток та узагальнення теорії трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) перетворювачів напруги з урахуванням багатоваріантності схемотехнічних рішень та мультифізичності процесів"), державний реєстраційний номер 0117U007714 (КПКВК 6541030).

1. 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.

2. Statistics Time Series.

URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (дата звернення 03.07.2020)

3. Mohammad Sarvi, Haniyeh Marefatjou. Compensation of Voltage Single-Phase SAG and SWELL Using Dynamic Voltage Restorer and Difference Per-Unit Value Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2013. Vol. 3. No 1. Pp. 83-92.

4. Santilio F.P., Silva T.V., Oliveira J.C., Barbosa J.A.F. A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. 2012. Vol. 1. No 10. Pp. 767-772.
DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj10.465>
5. Young Choon Chung, Alternating current power control device. Patent US No 5808454, 1998.
6. Липківський К.О., Халіков В.А., Можаровський А.Г. Пристрій для регулювання величини напруги змінного струму. Патент України на корисну модель № 67805, 2012.
7. Timothy F. Glennon, Byron R. Mehl. Regulated AC/DC converter. Patent US No 4739466, 1988.
8. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. Patent US No 9800161B2, 2017.
9. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.
10. Willems W., Vandoornt 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)*. At Lyngby, Denmark. 6-9 Oct. 2013. Pp. 1–5.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
11. 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.
12. Липковский К.А. Исполнительный орган дискретного стабилизатора напряжения переменного тока с декомпозицией ключевых элементов коммутатора. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 2. С. 35–41.
13. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Організація вольтодобавочного каналу в структурі відновлюваного джерела енергії постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 31–34.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.031>
14. Липковский К.А., Озерянский А.А., Градоблянский В.М. Особенности построения трансформаторно-тиристорных регуляторов выпрямленного напряжения. Методы и средства преобразования параметров электрической энергии. К.: Наукова думка. 1977. С. 24–28.

УДК 621.314

ОСОБЕННОСТИ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ ВИТКОВ ТРАНСФОРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ВОЛЬТОДОБАВОЧНОМ КАНАЛЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

К.А. Липковский, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

Одним из действенных путей обеспечения нормированной работы потребителя электроэнергии при нестабильном первичном источнике питания является организация соответствующего вольтодобавочного канала. В системе с источником постоянного тока вольтодобавление реализуется введением последовательно с нагрузкой выпрямительного полупроводникового моста, в диагональ которого подается энергия переменного тока, уровень напряжения которой целенаправленно меняется соответствующим преобразователем с трансформаторно-ключевой исполнительной структурой (ТКИС). Для достижения высокой эффективности использования ключевых элементов ТКИС предложено возложить функции выпрямления и регулирования напряжения на специфический класс ТКИС – многоуровневый выпрямитель, состоящий из трансформатора и конечного множества параллельно соединенных пар последовательно соединенных тиристоров, обитые точки которых присоединяются к соответствующим отводам секционированной вторичной обмотки трансформатора. При дискретно-разовом управлении тиристорами реализуется необходимое регулирование прибавляемых уровней напряжения. Линейность шкалы этих уровней обеспечивается предложенным законом секционирования обмотки трансформатора. Для такой системы электропитания характерны малые потери энергии в полупроводниковых элементах (одновременно работают только два тиристора), априорная невозможность возникновения аварийных ситуаций при переходах от одного уровня к другому. Библ. 14, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, системы питания постоянного тока, вольтодобавочный канал, многоуровневый выпрямитель, закон секционирования обмотки.

FEATURES OF SECTIONING THE TURNS OF THE TRANSFORMING ELEMENT OF THE TRANSFORMER-KEY ACTUATING STRUCTURE IN THE BOOST CHANNEL OF THE DC POWER SYSTEM

K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy
Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

One of the effective ways to ensure the normalized operation of the electricity consumer with an unstable primary power source is the organization of the corresponding voltage supply channel. In a system with a direct current source, the voltage supply is implemented by introducing a rectifier semiconductor bridge in series with the load, into the diagonal of which AC energy is supplied, the voltage level of which is purposefully changed by a corresponding converter with a transformer- and-switches executive structure (TSES). To achieve high efficiency of the use of key elements of TSVS, it is proposed to assign the functions of rectification and voltage regulation to a specific class of TSES – a multi-level rectifier consisting of a transformer and a finite set of parallel connected pairs of serially connected thyristors, the common points of which are connected to the corresponding taps of the sectioned secondary turns of the transformer. By discrete-time control of thyristors, it is necessary to regulate voltage levels, it is attached. The linearity of the scale of these levels is ensured by the proposed transformer sectioning law. This power supply system is characterized by small energy losses in semiconductor elements (only two thyristors work at a time), and the a priori impossibility of emergency situations during transitions from one level to another. References 14, tables 3, figures 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, DC power systems, booster channel, multi-level rectifier, winding sectioning law.

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

2. Statistics Time Series.

URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
(Accessed at 03.07.2020).

3. Mohammad Sarvi, Haniyeh Marefatjou. Compensation of Voltage Single-Phase SAG and SWELL Using Dynamic Voltage Restorer and Difference Per-Unit Value Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2013. Vol. 3. No 1. Pp. 83-92.

4. Santilio F.P., Silva T.V., Oliveira J.C., Barbosa J.A.F. A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. 2012. Vol. 1. No 10. Pp. 767-772.
DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj10.465>

5. Young Choon Chung, Alternating current power control device. Patent US No 5808454, 1998.

6. Lypkivskiy K.O., Khalikov V.A., Mozharovskiy A.G. Device for regulating the magnitude of AC voltage. Patent UA No 67805, 2012. (Ukr)

7. Timothy F. Glennon, Byron R. Mehl. Regulated AC/DC converter. Patent US No4739466, 1988.

8. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. Patent US No 9800161B2, 2017.

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

10. 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)*. At Lyngby, Denmark. 6-9 Oct. 2013. Pp. 1–5.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>

11. 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.

12. Lypkivskiy K.O. Executive body of discrete AC voltage stabilizer with decomposition of key switch elements. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2006. No 2. Pp. 35–41. (Rus)

13. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Organization of a boost channel in the structure of a renewable DC energy source. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 31–34. (Ukr)

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.031>

14. Lypkovskiy K.A., Ozerianskyi A.A., Gradoblianskyi V.M. Features of the construction of transformer-thyristor regulators of rectified voltage. *Methods and means of converting electrical energy parameters*. Kiev: Naukova Dumka, 1977. Pp. 24–28. (Rus)

Надійшла: 08.07.2020