

УДК 621.372.061

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В.П. Кабан, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
e-mail: lotox@ied.org.ua

Наведено результати порівняльного аналізу двох систем одночасного живлення споживачів від джерел струму і напруги, а саме: при підсумовуванні їх енергій на стороні змінного струму та після випрямлячів. Бібл. 2, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: індуктивність, ємність, перетворювач, комбіновані системи живлення.

У сучасній електротехніці проблема зменшення маси та габаритів електротехнічного устаткування залишається актуальною. Особливо вона загострилася останнім часом у зв'язку зі значним зростанням цін на електротехнічні матеріали. Пошук нових рішень у напрямку покращення масогабаритних показників електротехнічних виробів сприяє зменшенню затрат на їх виробництво та підвищенню конкурентоспроможності. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми у сфері джерел живлення електротехнологічних навантажень, які потребують стабілізації струму, є застосування систем комбінованого живлення [2]. Це такі системи, в яких навантаження отримує живлення одночасно від джерела струму та джерела напруги. Застосовують такі системи тоді, коли навантаження змінюється не в повному діапазоні. У цьому випадку існує можливість частину енергії, що постачається в навантаження, передати від джерела напруги, а саме ту її частину, яка відповідає мінімальному навантаженню. До таких навантажень належать газорозрядні лампи накачування лазерів, плазмотрони та інші прилади з фіксованою довжиною розрядного шляху. У цих приладах розряд відбувається як змінним, так і випрямленим струмом. Тому відповідно існують дві схеми комбінованого живлення: з підсумовуванням енергії при змінному струмі та при випрямленому. Кожна з цих схем має свої переваги та недоліки.

Метою роботи є порівняльний аналіз схем комбінованого живлення та рекомендації щодо можливості ефективного застосування в тому чи іншому випадку.

Нагадаємо, що канал стабілізованого струму має більшу встановлену потужність електромагнітних елементів, ніж канал напруги, тому що потребує застосування спеціальних пристроїв, які б перетворювали джерело напруги промислової мережі у джерело струму. В зв'язку з цим тим ефективнішою буде схема комбінованого живлення, чим меншою буде потужність джерела струму. Беручи до уваги, що як джерело струму в комбінованих системах живлення досить часто застосовуються індуктивно-ємнісні перетворювачі (ІСП) [1], у подальшому будемо аналізувати саме цей тип джерел струму. Серед значної кількості відомих схем ІСП однією з найбільш ефективних з точки зору установленної потужності елементів є схема Штейнметца (рис. 1). Вона складається з мінімальної кількості елементів (дросель та конденсатор), кожен з яких має установлену потужність, що становить 0,58 від потужності навантаження. Вважаючи, що канал струму передбачає ще й застосування трансформатора для узгодження вихідних параметрів ІСП з параметрами навантаження, загальна установлена потужність елементів буде становити 2,16 від потужності навантаження, в той час, коли канал напруги має установлену потужність, що дорівнює потужності навантаження.

У схемі комбінованого живлення, що передбачає об'єднання каналів на стороні випрямленого струму (рис. 2), канали не мають електромагнітного зв'язку, тому для розрахунків справедливі всі наведені тут викладення. Наприклад, якщо потужності каналів мають рівну величину, то встановлена потужність елементів всієї системи комбінованого живлення становитиме 1,58 від потужності навантаження. Якщо ж застосувати тільки канал постійного струму, то установлена потужність елементів становитиме 2,16. Це підтверджує ефектив-

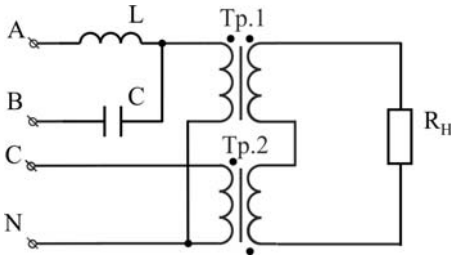


Рис. 1

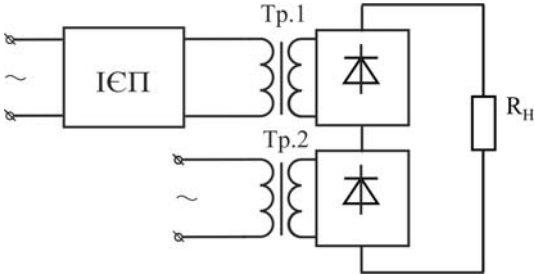


Рис. 2

ність застосування системи комбінованого живлення. Якщо канали об'єднуються на стороні змінного струму, існує електромагнітний зв'язок між ними, що може впливати на установлену потужність елементів ІЄП. Розглянемо цей випадок більш детально, оскільки він є більшою мірою універсальним, бо дає змогу жити споживачів як змінним, так і випрямленим струмами.

На рис. 1 показано однофазний еквівалент реальної схеми комбінованого живлення. Тут елементи L і C утворюють ІЄП, котрий разом з трансформатором $Tr.1$ створює канал стабілізованого струму. До каналу напруги належить трансформатор $Tr.2$. Його вторинна обмотка з'єднана послідовно з вторинною обмоткою $Tr.1$, а навантаження R_H підключається до вільних кінців вторинних обмоток обох трансформаторів. На рис. 3 показано розрахункову схему для каналу струму, створену за таких припущень: всі елементи ІЄП ідеальні, дросель лінійний, трансформатори без втрат, напруга та струм синусоїдальні, система живлення симетрична, навантаження активне.

Крім того, відповідно до рис. 1 маємо

$$\dot{E}_1 = U; \quad \dot{E}_2 = U e^{j240}; \quad \dot{E}_3 = kU e^{-j60}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт трансформації трансформатора $Tr.2$, який показує відношення величини напруги, що вноситься в коло навантаження, до напруги джерела живлення. Однією з основних вимог ефективного функціонування комбінованого способу живлення є збіг за напрямком векторів вихідного струму ІЄП та напруги, що трансформується в коло навантаження.

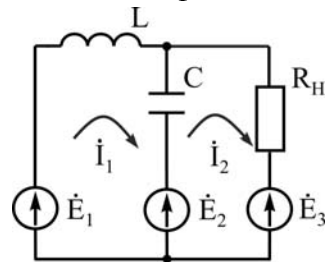


Рис. 3

В схемі Штейнметца вихідний струм відстає від напруги живлення на 60° . Тому для виконання цієї умови трансформатор $Tr.2$ підключено до фази C , а його обмотки включено назустріч одна одній. Величина напруги, що вноситься, залежить від діапазону зміни навантаження та має бути меншою від мінімального значення напруги навантаження. Щоб виявити тенденцію зміни величин параметрів ІЄП від величини напруги, що вноситься в коло навантаження, розглянемо декілька характерних значень коефіцієнта k , а саме: 0 (відповідає випадку в разі відсутності каналу напруги); 0,5; 1,0; 2.

Відповідно до позначень, прийнятих на рис. 3, запишемо матричне рівняння контурних струмів:

$$\dot{E}_k = Z_k \dot{I}_k, \quad (2)$$

де \dot{E}_k – k -стовпчикова матриця контурних ЕРС, елементами якої є суми ЕРС відповідного контура; Z_k – квадратна матриця контурних опорів; \dot{I}_k – стовпчикова матриця контурних струмів.

Для цього випадку відповідно до рис. 1 ці співвідношення матимуть такий вигляд:

$$\dot{E}_k = \begin{bmatrix} \dot{E}_I \\ \dot{E}_{II} \end{bmatrix}; \quad \dot{I}_k = \begin{bmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_{II} \end{bmatrix}; \quad Z_k = \begin{bmatrix} X_L + X_C & -X_C \\ -X_C & X_C + R_H \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де X_L – реактивний опір дроселя; а X_C – реактивний опір конденсатора.

Основною вимогою для стабілізації струму ІЄП є така умова: $Z_{11} = 0$, тобто $X_L + X_C = 0$. При виконанні цієї умови із (2) з урахуванням (3) отримаємо вирази для знаходження струму в елементах схеми:

$$\dot{I}_I = \frac{\dot{E}_I (n-j) - j \dot{E}_{II}}{x}; \quad (4)$$

$$\dot{I}_{II} = \frac{\dot{E}_I}{jx}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_I n - j \dot{E}_{II}}{x}, \quad (6)$$

де n – відносне навантаження $n = \frac{R_H}{x_c} = \frac{R_H}{x_L} = \frac{R_H}{x}$; \dot{E}_I , \dot{E}_{II} – контурні ЕРС відповідно першого та другого контурів; \dot{I}_I , \dot{I}_{II} – контурні струми; \dot{I}_C – струм конденсатора.

Контурні ЕРС знаходимо, підставивши з (1) значення ЕРС, що діють у схемі. У цьому випадку контурна ЕРС першого контура постійна, а другого – залежить від коефіцієнта трансформації Тр.2. Вираховані для прийнятих значень коефіцієнта трансформації контурні ЕРС наведено в таблиці.

З виразу (5) легко зробити висновок, що струм навантаження не залежить від величини його опору, а визначається лише величиною ЕРС \dot{E}_I та реактивним опором x .

Для визначення установленої потужності елементів ІЄП скористаємося методикою [1]. Абсолютне значення потужності елементів ІЄП знайдемо як множник квадрату модуля струму, що протікає через елемент, на його реактивний опір:

$$Q_L = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_I^2 + E_{II}^2 + 2E_I E_{II} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{x}; \quad (7)$$

$$Q_C = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_{II}^2}{x}, \quad (8)$$

де Q_L та Q_C – відповідно реактивна потужність дроселя та конденсатора. При порівняльному аналізі частіше за все використовують поняття відносної потужності елемента q , яка представляє собою відношення абсолютної реактивної потужності елемента до потужності, яка виділяється в навантаженні P_H . У цьому випадку потужність навантаження складається з двох частин: постійної складової, що вноситься каналом напруги P_{H2} , та потужності, яка вноситься каналом джерела струму P_{H1} . У подальших розрахунках будемо розглядати тільки елементи каналу струму, тому що тільки канал струму реагує на зміну навантаження. У зв'язку з цим питома потужність елементів буде визначатись як відношення абсолютної потужності елемента до потужності складової в загальному навантаженні, що відповідає каналу струму, тобто P_{H1} . Для такої схеми $P_{H1} = E^2 n / x$, тому питома потужність відповідно в дроселі та конденсаторі буде характеризуватись такими виразами:

$$q_L = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_I^2 + E_{II}^2 + 2E_I E_{II} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{n E_I^2}; \quad (9)$$

$$q_C = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_{II}^2}{n E_I^2}. \quad (10)$$

Нагадаємо, що під поняттям установленої потужності елемента Q_{stab} розуміють відношення максимального абсолютного значення реактивної потужності елемента до номінальної потужності навантаження, тобто при n_{calcul} . У свою чергу n_{calcul} знаходять із порівняння величин оптимального n_{opt} та максимального n_{max} значень опору навантаження [1]. При цьому більше з них приймають за розрахункове. Знаходимо максимальне значення, прирівнявши поточне значення потужності елемента до величини потужності в режимі короткого замикання. З виразів (7) і (8) маємо

$$n_{Cmax} = -n_{Lmax} = 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (11)$$

де індексами C та L позначено дані, що стосуються відповідно конденсатора та дроселя.

Оптимальне значення опору навантаження – це значення, при якому відносна потужність елемента має мінімум. Прирівнявши першу похідну виразів (9) і (10) нулю, знаходимо

$$n_{Lopt} = \pm \sqrt{1 + \frac{E_{II}^2}{E_I^2} + 2 \frac{E_{II}}{E_I} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}; \quad (12)$$

$$n_{Copt} = \frac{E_{II}}{E_I}. \quad (13)$$

Результати розрахунків, проведених за формулами (11)...(13), представлено в таблиці.

№	k	E_I	E_{II}	n_{Copt}	n_{Lopt}	n_{Cmax}	n_{Lmax}	$n_{calcul.}$	$Q_{Cstab.}$	$Q_{Lstab.}$
1	0,5	$\sqrt{3}Ue^{j30^\circ}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}Ue^{j210^\circ}$	0,5	0,5	0	0	0,5	1,0	2,33
2	1,0	-//-	Ue^{j180°	0,58	0,58	0,58	-0,58	0,58	1,73	1,73
3	2,0	-//-	$\sqrt{3}Ue^{j150^\circ}$	1,0	1,0	1,73	-1,73	1,0	3,73	3,73
4	0	-//-	Ue^{j240°	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

В останньому рядку таблиці наведено дані, що стосуються звичайної схеми Штейнметца, а у перших трьох рядках та ж схема у випадку комбінованого способу живлення. З таблиці слідує, що показники розрахункових параметрів залежать від величини напруги, яка вноситься в коло навантаження від джерела напруги. Установлена потужність елементів ІЄП значною мірою погіршується при застосуванні цієї схеми в системі комбінованого живлення.

Висновки. Проведений аналіз показує, що варіант із складанням потужностей на стороні випрямленого струму при застосуванні схеми Штейнметца є більш ефективним. Тут підсумкова потужність елементів у випадку однакової потужності обох каналів складає 1,58 потужності навантаження, тоді як у випадку складання потужностей на стороні змінного струму ця величина значно більша.

Результати проведених досліджень стосуються ІЄП, що виконаний за схемою Штейнметца. Стосовно застосування інших схем ІЄП в комбінованих джерелах живлення потрібно проводити додаткові дослідження.

1. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. – К.: Наук. думка, 1981. – 174 с.

2. Липковский К.А., Александров М.М., Эсибян Э.М. Особенности расчета элементов источника комбинированного питания плазмотрона // Регуляторы и стабилизаторы тока. – К.: Наук. думка, 1977. – С. 133–139.

УДК 621.372.061

В.П. Кабан, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Сравнительный анализ электрических систем комбинированного питания

Представлены результаты сравнительного анализа двух систем одновременного питания потребителей от источника тока и источника напряжения, а именно: при суммировании их энергий на стороне переменного тока и после выпрямителей. Библи. 2, рис. 3, таблица.

Ключевые слова: индуктивность, емкость, преобразователь, комбинированные системы питания.

V. Kaban

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

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Comparative analysis of electric power combined systems

The results of comparative analysis of the two systems simultaneously power consumer from the current source and the voltage source are presented. There are submitted the summation of their energies on the AC side and the summation after rectifier. References 2, figure 3, table.

Key words: inductance, capacitance, converter, combined power system.

Надійшла 1.04.2015

Received 1.04.2015