

комп'ютерне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у системі "перемішувач – ківш з рідким металом" для установки "ківш – піч", яка використовується для позапічної обробки рідкої сталі. Ефективність перемішування оцінювалася за усередненою по меридіанному перерізу ковша швидкістю руху металу. Отримано значення усередненої та максимальної швидкостей, а також потужності джоулевого тепловиділення в металі для різних радіусів котушки перемішувача, рівнів розміщення його відносно поверхні металу і частоти струму живлення. Бібл. 4, рис. 7.

Ключові слова: електромагнітне перемішування, рідкий метал, металургійний ківш, пульсуюче магнітне поле, комп'ютерне моделювання.

Yu.M. Goryslavets, O.I. Glukhenkyi, O.I. Bondar

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Stirring of liquid metal in ladle furnace by pulsing magnetic field

It was proposed to stir liquid metal in metallurgical ladle furnace using pulsing magnetic field, which creates single phase electromagnetic stirrer, disposed above the ladle. The computer modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes in system "stirrer – ladle with liquid metal" was carried out in relation to installation "ladle – furnace", which is used for ladle processing of liquid steel. The effectiveness of stirring was estimated by averaged velocity of metal on the meridian section of ladle. Values of averaged and maximum velocity, as well as resistive losses in metal for different radius of coil of stirrer, location levels of it relative to the surface of metal and applied power frequency were obtained. References 4, figures 7.

Key words: electromagnetic stirrer, liquid metal, metallurgical ladle furnace, pulsing magnetic field, computer modelling.

Надійшла 13.07.2016

Received 13.07.2016

УДК 621.372.061

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКТИВНО-ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ Г-ПОДІБНОЇ СТРУКТУРИ В СИСТЕМАХ КОМБІНОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ

В.П. Кабан, канд. техн. наук

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

Наведено результати порівняльного аналізу основних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів Г-подібної структури у випадку застосування їх у системах комбінованого живлення електротехнологічних навантажень. Виявлено схеми з найменшою установленою потужністю елементів та видано рекомендації щодо їх застосування. Бібл. 2, рис.2, табл.2.

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

Комбіновані системи найчастіше застосовують для побудови систем живлення деяких електротехнологічних навантажень, які потребують незмінного струму та опір яких змінюється в неповному діапазоні. В цьому випадку існує можливість постачати електроенергію в навантаження від двох джерел: джерела струму та напруги [2]. Застосування такого способу живлення дає змогу значно зменшити установлену потужність устаткування. В той же час, якщо навантаження живиться змінним струмом, а джерелом струму є індуктивно-ємнісний перетворювач (ІЄП), то його техніко-економічні показники можуть погіршуватись залежно від величини напруги, яка постачається в навантаження, та самої схеми ІЄП.

Метою роботи є виявлення найбільш ефективною з точки зору встановленої потужності елементів схеми ІЄП Г-подібної структури для застосування в системах комбінованого

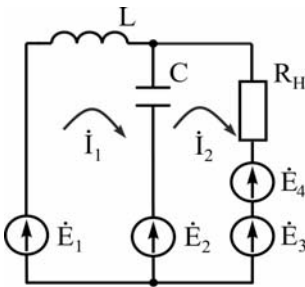


Рис. 1

живлення. Схеми ІЄП цієї структури є найпростішими та такими, що найчастіше застосовуються як джерела струму.

Для виконання поставленої мети необхідно провести порівняльний аналіз схем ІЄП, для чого скористаємося узагальнюючим однофазним еквівалентом, схема якого показана на рис. 1. Тут ЕРС E_1, E_2, E_3 представляють собою фазні напруги трифазної мережі живлення, а E_4 – напругу, що вноситься від джерела напруги в коло навантаження R_n . Аналіз проводимо за таких припущень: елементи ІЄП (конденсатор C та дросель L) ідеальні, дросель лінійний, трансформатори без втрат, напруга та струм синусоїдальні, система живлення трифазна симетрична, навантаження активне. Крім того,

відмічаємо, що напруга від E_4 має співпадати за фазою з напрямком струму від ІЄП. У зв'язку з цим необхідно спочатку обчислити величину струму тієї чи іншої схеми ІЄП, а потім задатись величиною напруги, що вноситься, враховуючи, що напрямок її співпадає з напрямком струму в навантаженні. Основною вимогою роботи схеми в режимі стабілізації струму є рівність реактивних опорів дроселя та конденсатора, тобто $X_L + X_C = 0$. При виконанні цієї умови струм в навантаженні не залежить від його величини і визначається лише величиною контурної ЕРС першого контура та індуктивного опору дроселя. Таким чином, у цьому випадку завжди є змога знайти величину та напрямок струму в навантаженні незалежно від того вноситься чи ні додаткова напруга від джерела E_4 .

У подальших розрахунках будемо розглядати узагальнюючий еквівалент стосовно фази А. Це означає, що на вході схеми діє напруга цієї фази, тобто $E_1 = U$, а на місці інших ЕРС можуть бути прикладені напруги фаз В (Ue^{j240°) та С (Ue^{j120°). У трифазній мережі для Г-подібної структури можливо сім варіантів підключення фаз [2]. Кожному варіанту відповідає окрема схема. Перелік варіантів та значення ЕРС наведено в табл. 1. Крім того, величину напруги, що вноситься від джерела напруги, представимо як деяку долю від фазного значення, тобто kU . Для визначення залежності потужності елементів схеми від величини напруги, що вноситься, припустимо, що коефіцієнт k може набувати таких значень: 0,5; 1; 2.

З урахуванням показаних на рис. 1 позначень та прийнятих припущень отримаємо вирази для знаходження струму в елементах схеми:

$$\dot{I}_I = \frac{\dot{E}_I(n-j) - j\dot{E}_{II}}{x}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{II} = \frac{\dot{E}_I}{jx}; \quad (2)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_I n - j\dot{E}_{II}}{x}, \quad (3)$$

де n – відносне навантаження $n = \frac{R_n}{x_c} = \frac{R_n}{x_l} = \frac{R_n}{x}$; \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 першого контура легко знаходяться для кожного варіанта (див. табл. 1), а ЕРС другого контура представляє собою векторну суму ЕРС \dot{E}_2, \dot{E}_3 та напруги, що додатково вноситься \dot{E}_4 . Для визначення ЕРС \dot{E}_4 для кожного варіанта знаходимо величину та напрямок струму в навантаженні (див. табл. 1). Беручи до уваги, що модуль додаткової напруги може набувати значень 0,5 U ; U та $2U$, відзначаємо, що для кожного варіанта існують відповідно три значення ЕРС \dot{E}_4 , а отже, і ЕРС другого контура. Таким чином, для кожного варіанта в процесі аналізу необхідно буде визначати величину струму в елементах схеми для цих трьох випадків.

Таблиця 1

№ з/п	\dot{E}_I	\dot{E}_2	\dot{E}_3	\dot{I}_H	\dot{E}_4	\dot{E}_I	\dot{E}_{II}
1	U	0	0	Ue^{-j90°/x	kUe^{-j90°	U	kUe^{j90°
2	U	Ue^{j240°	Ue^{j120°	$\sqrt{3}Ue^{-j60^\circ}/x$	kUe^{-j60°	$\sqrt{3}Ue^{j30^\circ}$	$Ue^{j240^\circ} - (Ue^{j120^\circ} + kUe^{-j60^\circ})$
3	U	Ue^{j120°	Ue^{j240°	$\sqrt{3}Ue^{-j120^\circ}/x$	kUe^{-j120°	$\sqrt{3}Ue^{-j30^\circ}$	$Ue^{j120^\circ} - (Ue^{j240^\circ} + kUe^{-j120^\circ})$
4	U	Ue^{j240°	0	$\sqrt{3}Ue^{-j60^\circ}/x$	kUe^{-j60°	$\sqrt{3}Ue^{j30^\circ}$	$Ue^{j240^\circ} - kUe^{-j60^\circ}$
5	U	Ue^{j120°	0	$\sqrt{3}Ue^{-j120^\circ}/x$	kUe^{-j120°	$\sqrt{3}Ue^{-j30^\circ}$	$Ue^{j120^\circ} - kUe^{-j120^\circ}$
6	U	0	Ue^{j240°	Ue^{-j90°/x	kUe^{-j90°	U	$-(Ue^{j240^\circ} + kUe^{-j90^\circ})$
7	U	0	Ue^{j120°	Ue^{-j90°/x	kUe^{-j90°	U	$-(Ue^{j120^\circ} + kUe^{-j90^\circ})$

Порівняльний аналіз проводимо згідно з методикою, викладеною в [2]. Потужність елементів схеми визначаємо як множник квадрату модуля струму, що протікає через елемент, на його реактивний опір:

$$Q_L = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_I^2 + E_{II}^2 + 2E_I E_{II} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{x}, \quad (4)$$

$$Q_C = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_{II}^2}{x}, \quad (5)$$

де Q_L та Q_C – реактивна потужність дроселя та конденсатора. При визначенні відносної потужності q візьмемо до уваги ту обставину, що від джерела напруги вноситься постійна складова потужності, а потужність від джерела струму змінюється відповідно до величини навантаження, тому відносну потужність будемо розраховувати як відношення абсолютної потужності елемента до частини потужності навантаження, що вноситься від каналу струму:

$$q_L = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_I^2 + E_{II}^2 + 2E_I E_{II} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{n E_I^2}, \quad (6)$$

$$q_C = \frac{n^2 E_I^2 + 2n E_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + E_{II}^2}{n E_I^2}. \quad (7)$$

Згідно з методикою знаходження установленної потужності елемента [1] необхідно знайти оптимальний опір навантаження n_{opt} , при якому відносна потужність має найменше значення. Цей опір приймають за розрахунковий за винятком тих випадків, коли в середині діапазону зміни навантаження величина потужності елемента перевищує його значення, знайдене попереднім способом. В останньому випадку знаходять максимальне значення опору навантаження n_{max} , при якому потужність елемента дорівнює потужності в режимі короткого замикання і його беруть за розрахункове. Формальний підхід до визначення розрахункового опору навантаження можна сформулювати таким чином: знаходимо оптимальне та максимальне значення опору і більше з них приймаємо за розрахункове.

Оптимальне значення знаходимо, прирівнявши першу похідну виразів (6) та (7) нулю:

$$n_{Lopt} = \pm \sqrt{1 + \frac{E_{II}^2}{E_I^2} + 2 \frac{E_{II}}{E_I} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}; \quad (8)$$

$$n_{Copt} = \frac{E_{II}}{E_I}. \quad (9)$$

Максимальне значення відповідно до визначення має вигляд

$$n_{C_{\max}} = -n_{L_{\max}} = 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (10)$$

Хід обрахунків наступний: спочатку визначаємо контурні ЕРС \dot{E}_I та \dot{E}_{II} . Остання залежить від коефіцієнта k . Формули для її обрахунків у кожному варіанті наведені в табл. 1, а відповідне значення в табл. 2. Підставляємо їх у вирази (8), (9) та знаходимо оптимальне значення опору навантаження. Далі з (10) знаходимо максимальні значення (див. табл. 2).

Таблиця 2

№ з/п	k	\dot{E}_{II}	$n_{L_{\text{opt}}}$	$n_{C_{\text{opt}}}$	$n_{L_{\text{max}}}$	n_{L_p}	n_{C_p}	\bar{Q}_L	\bar{Q}_C
1	0,5	$0,5Ue^{j90^\circ}$	–	0,5	-1,0	–	1,0	3,2	2,25
	1	Ue^{j90°	1,41	1,0	-2,0	1,41	2,0	4,82	4,5
	2	$2Ue^{j90^\circ}$	1,73	2,0	-4,0	1,73	4,0	8,61	9,0
2	0,5	$1,32Ue^{j260^\circ}$	0,88	0,76	1,16	1,16	0,76	0,52	0,36
	1	Ue^{j240°	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
	2	Ue^{j180°	0,76	0,58	-0,58	0,76	0,58	1,77	1,72
3	0,5	$2,18Ue^{j83^\circ}$	1,13	1,26	-2,31	1,13	2,31	4,58	2,65
	1	$2,64Ue^{j80^\circ}$	1,22	1,52	-2,86	1,22	2,86	5,93	6,53
	2	$3,6Ue^{j74^\circ}$	1,44	2,08	-4,0	1,44	4,0	8,44	9,11
4	0,5	$0,86Ue^{j210^\circ}$	0,71	0,5	0	0,71	0,5	1,06	1,0
	1	Ue^{j180°	0,76	0,58	-0,58	0,76	0,58	1,78	3,0
	2	$1,73Ue^{j150^\circ}$	1,0	1,0	-1,73	1,0	1,73	3,73	4,04
5	0,5	$1,32Ue^{j100^\circ}$	0,88	0,76	-1,16	0,88	1,16	2,7	2,81
	1	$1,73Ue^{j90^\circ}$	1,0	1,0	-1,73	1,0	1,73	3,8	4,04
	2	$2,64Ue^{j80^\circ}$	1,22	1,53	-2,87	1,22	2,87	6,16	6,55
6	0,5	$1,45Ue^{j70^\circ}$	1,85	1,45	-2,73	1,85	2,73	6,8	6,23
	1	$1,93Ue^{j75^\circ}$	1,98	1,93	-3,74	1,98	3,74	8,6	8,47
	2	$2,9Ue^{j79^\circ}$	2,23	2,9	-5,7	2,23	5,7	12,62	12,85
7	0,5	$0,62Ue^{-j36^\circ}$	1,61	0,62	0,73	1,61	0,73	2,36	0,5
	1	$0,52Ue^{j15^\circ}$	1,59	0,52	-0,27	1,59	0,52	3,29	1,17
	2	$1,24Ue^{j65^\circ}$	1,81	1,24	-2,25	1,81	2,25	6,04	5,18

Отримані дані, позначені індексом L, стосуються мінімізації встановленої потужності дроселя, а індексом C – конденсатора.

Порівнюючи величини оптимальних та максимальних значень, більше з них приймаємо за розрахункове (див. табл. 2).

Маючи значення контурних ЕРС та розрахункового відносного опору, знаходимо установлену потужність елементів ІСП, використовуючи вирази (6), (7). Остаточні дані наведені в табл. 2, де \bar{Q}_L та \bar{Q}_C – установлені потужності відповідного елемента. Порівнюючи їх, приходимо до висновку, що найкращі дані має схема, властива другому варіанту. Однофазний варіант цієї схеми показано на рис. 2. Дійсно, в режимі, коли навантаження отримує енергію від двох джерел рівною мірою ($k=1$), встановлена потужність дроселя та конденсатора дорівнює 0,58 від потужності навантаження. Легко підрахувати, що така схема живлення дає

зможу зменшити встановлену потужність реактивних елементів ІЄП на 50 %, у порівнянні з варіантом живлення тільки від джерела струму.

Наступна важлива особливість полягає в тому, що подальше збільшення частки енергії, яка надходить від джерела напруги, не дає змоги зменшити установлену потужність реактивних елементів. Так, уже при $k=2$ вона складає для кожного елемента більш ніж 1,7 від потужності навантаження.

Висновки. Серед схем ІЄП Г-подібної структури типу LC найкращі показники за встановленою потужністю реактивних елементів має схема, виконана згідно з другим варіантом («зірка»). Її слід застосовувати в комбінованих системах живлення таким чином, щоб частка енергії, що вноситься від джерела напруги, не перевищувала 50 %.

Що стосується поширення висновків на Г-подібні схеми ІЄП типу CL, то тут необхідні додаткові дослідження.

1. Волков І.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: Сб. науч. тр. – 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

Эффективность использования индуктивно-емкостных преобразователей Г-образной структуры в системах комбинированного питания

Представлены результаты сравнительного анализа схем индуктивно-емкостных преобразователей Г-образной структуры в случае использования их в системах комбинированного питания электротехнологических нагрузок. Определены схемы с наименьшей установленной мощностью элементов и выданы рекомендации по их использованию. Библ. 2, рис. 2, табл. 2.

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

V.P. Kaban

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

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The efficiency of use the inductive-capacitive converters of L-shaped structure in the combined power systems

The results of comparative analysis of the schemes of inductive-capacitive converters of L-shaped structure were presented in the case of use in the combined power systems of electrotechnological loads. The schemes with the smallest installed capacity of elements were identified and recommendations for their use were issued. References 2, figures 2, tables 2.

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

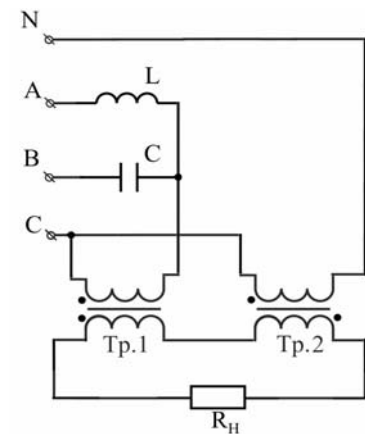


Рис. 2

Надійшла 6.04.2016

Received 6.04.2016