

*к.т.н., п.н.с. Комісаренко О.І.,
с.н.с. Ламанов С.Л.,
к.т.н., директор НДПКІ „Параметр” Михайлова Л.Ф.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВІДКЛЮЧЕННЯ СИЛОВИХ ЛАНЦЮГІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МІНІМІЗАЦІЄЮ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ В НАВАНТАЖЕННІ

Проведено оптимізацію енерговиділення в навантаженні силового ланцюга постійного струму в залежності від форми кривої спадання струму $i(t)$. Показано залежність енерговиділення в навантаженні від максимально припустимого рівня комутаційних перенапруг. Доведено, що для суттєвого зниження енерговиділення в навантаженні, за інших рівних умов, необхідно покращувати форму кривої $i(t)$, а коефіцієнт комутаційних перенапруг доводити до максимально допустимого рівня.

Проблема та її зв'язок із науковими й практичними задачами. Відключення деяких видів навантажень потребує мінімізації енергетичних характеристик процесу відключення. Прикладом такої потреби є захисне відключення при зриві інвертування автономних інверторів із ланкою постійного струму. В них для збереження напівпровідникових приладів необхідно мінімізувати джоулів інтеграл (захисний показник). Наявність у ланцюзі значної індуктивності фільтрових і комутуючих дроселів потребує розсіяння запасу електромагнітної енергії без істотних перенапруг і приводить до великого побіжного виділення енергії джерела живлення (ДЖ).

Результати аналізу факторів, що впливають на енерговиділення та пошук шляхів зниження енергії на навантаженні дозволяють виробити рекомендації по конструюванню комутаційних апаратів із кращими характеристиками.

Аналіз досліджень і публікацій. У [1] наведено методику досліджень процесу відключення ланцюгів постійного струму контактними комутаційними апаратами, використовуючи яку у [2] наведено дослідження впливу форми кривої спаду струму $i(t)$ на енерговиділення від ДЖ. Згідно проведеному аналізу зроблено висновки про те, що енергія, яка надходить від ДЖ - $W_{ДЖ}$, може змінюватися в десятки разів (у розглянутому діапазоні зміни форми кривої $i(t)$). Таким чином, доведено, що змінюючи конструкцію й параметри дугогасильного пристрою (ДП), від

яких залежить форма кривої спаду струму $i(t)$, можна суттєво впливати на кількість енергії від ДЖ, що надходить у ланцюг, що відключається. Однак слід зауважити, що при коефіцієнті перенапруг більш ніж 2,3 залежність енергії дуги відключення від форми кривої $i(t)$ порівняно слабка на відміну від енерговиділення у навантаженні [3].

Постановка задачі. Енергія, що розсіюється на активному опорі навантаження, не має такого безпосереднього впливу на комутаційний апарат, як енергія дуги. Однак при аварійних відключеннях комутаційний апарат не можна розглядати поза його зв'язком із навантаженням.

Аналіз і оптимізація енергетичних характеристик навантаження дозволить визначити шляхи зниження енерговиділення на навантаженні в період аварійних відключень. Тому ставиться задача знайти форму кривої $i(t)$, яка мінімізує W_H , при заданих обмеженнях.

Виклад матеріалу і його результати. Розглянемо електричний ланцюг, що вимикається, як об'єкт керування (рис.1). Для оптимізації процесу застосуємо математичний апарат теорії оптимального управління [4].

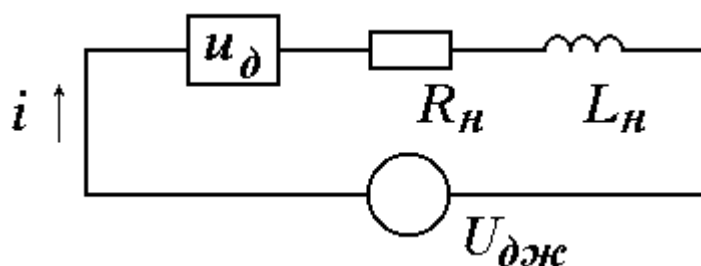


Рисунок 1 - Електричний ланцюг, що вимикається, як об'єкт керування.

Всі параметри розглядаються у відносних одиницях [1].

Необхідно визначити алгоритм керування процесом відключення, що переводить об'єкт із початкового стану при

$$i^*(0)=1, \quad (1)$$

у кінцевий стан з

$$i^*(t_{\partial}^*)=0, \quad (2)$$

при мінімумі значень функціоналу енерговиділення у навантаженні:

$$W_H^* = \int_0^{t_{\partial}^*} i^{*2} dt^*. \quad (3)$$

Запишемо систему рівнянь, що описує об'єкт з урахуванням рівняння, еквівалентного функціоналу (3):

$$\begin{cases} \frac{di^0}{dt^*} = i^{*2} = f^0 \\ \frac{di^*}{dt^*} = -i^* - u^* + 1 = f^1 \end{cases}, \quad (4)$$

де

$$i^0 = \int_0^{t_\partial^*} i^{*2} dt^*. \quad (5)$$

Складемо функцію Гамильтона і визначимо H' :

$$H = \Psi^0 \cdot i^{*2} + \Psi^1 - \Psi^1 \cdot u^* - \Psi^1 \cdot i^*, \quad (6)$$

$$H' = -\Psi^1 \cdot u^*. \quad (7)$$

Враховуючи, що на керування накладаються обмеження, які враховують фізичний сенс задачі:

$$0 \leq u^* \leq K_\Pi^{\max}, \quad (8)$$

де K_Π^{\max} – максимально припустимий рівень комутаційних перенапруг отримаємо:

$$\tilde{u}^* = 0.5 K_\Pi^{\max} (1 - \text{sign} \Psi^1). \quad (9)$$

При $\Psi^1 = 0$ має місце особливе керування, якому відповідає система сполучених рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi^0}{dt^*} = 0 \\ \frac{d\Psi^1}{dt^*} = -2i^* \Psi^0 + \Psi^1 \end{cases}. \quad (10)$$

Запишемо систему рівнянь, що складається з рівняння об'єкта і сполученого рівняння

$$\begin{cases} \frac{di^*}{dt^*} = 1 - u^* - i^* \\ \frac{d\Psi^1}{dt^*} = \Psi^1 + 2i^* \end{cases}. \quad (11)$$

При цьому враховано, що

$$\Psi^0(t^*) = -1 \quad (12)$$

Вирішуючи систему (11) з урахуванням (2) і умов трансверсальності, отримаємо:

$$\Psi^1(t^*) = 2(K_{\Pi} - 1) - K_{\Pi} \exp(-t^*) - K_{\Pi} \exp(t^* - 2t_{\partial}^*). \quad (13)$$

Алгоритм оптимального керування збігається із знайденими раніше [3,4]. Згідно з ним маємо:

$$i_o^*(t^*) = 1 - K_{\Pi} [1 - \exp(-t^*)]. \quad (14)$$

Підставив (14) у функціонал (5), визначимо в загальному вигляді вираження для оптимального значення енергії, що виділяється в навантаженні при відключенні:

$$\begin{aligned} W_{Ho}^* &= \int_0^{t_{\partial}^*} \{1 - K_{\Pi} [1 - \exp(-t^*)]\}^2 \cdot dt^* = \\ &= 0.5K_{\Pi}^2 + 0.5(K_{\Pi} + 1)^2 + t_{\partial}^* - 2K_{\Pi}(K_{\Pi} - 1)t_{\partial}^* + 2 = \\ &= 0.5 - (K_{\Pi} - 1)[1 - (K_{\Pi} - 1)t_{\partial}^*] \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 2 наведено графік залежності W_{Ho}^* , побудований на підставі отриманого математичного виразу.

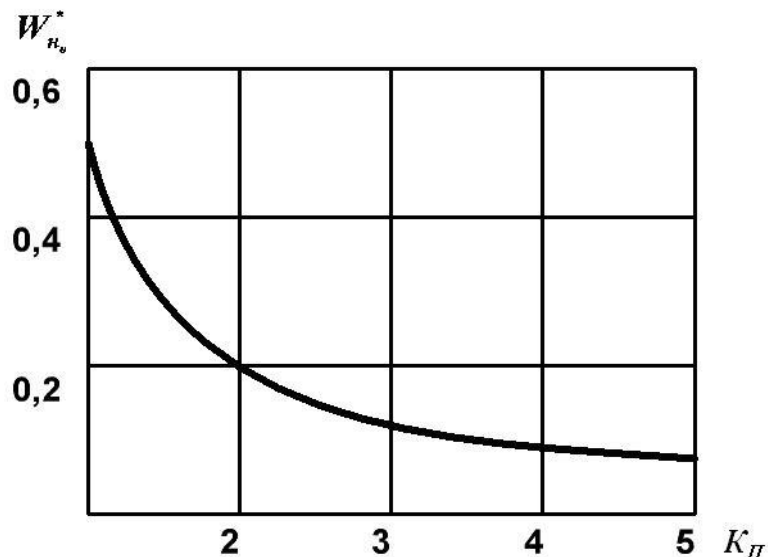


Рисунок 2 – Залежності інтегральних характеристик оптимального процесу відключення від величини комутаційних перенапруг K_{Π} .

Висновки й напрямок подальших досліджень. Таким чином, для того щоб зменшити енерговиділення на навантаженні до мінімуму при інших рівних умовах і заданому обмеженні по рівню K_{Π} , необхідно прагнути до того, щоб ДП реалізував процес відключення при підтримці напруги на ньому на рівні K_{Π} у весь період відключення. Причому, K_{Π} повинен утримуватись на максимально припустимому рівні K_{Π}^{\max} .

В подальшому необхідно порівняти оптимальний процес (14) з емпіричним [3].

Проведена оптимизация выделения энергии в нагрузке силовой цепи постоянного тока в зависимости от формы кривой спада тока $i(t)$. Показана зависимость энерговыделения в нагрузке от максимально допустимого уровня коммутационных перенапряжений. Доказано, что для существенного снижения энерговыделения в нагрузке, при прочих равных условиях, необходимо улучшать форму кривой $i(t)$, а коэффициент коммутационных перенапряжений доводит до максимально допустимого уровня.

Optimization of energy of selection is conducted in loading of power circuit of direct current depending on the form of curve of slump of current and(t). Dependence of energy of selection is rotined in loading from the maximally possible level of interconnect overstrains. It is well-proven that for the substantial decline of energy of selection in loading, other things being equal, it is necessary to improve the form of curve and(t), and to take the coefficient of interconnect overstrains to the maximally possible level.

Бібліографічний список

1. Комиссаренко А.И., Ламанов С.Л. Методика исследований процесса отключения цепей постоянного тока контактными коммутационными аппаратами. Вісн. СХУ ім В.Даля.-2002.-№1(47), С. 18-24.
2. Комиссаренко А.И., Ламанов С.Л., Ткаченко Ю.С. О роли источника питания в энергетическом балансе отключаемой цепи постоянного тока. / Вісн. СХУ ім В.Даля.-2003.-№4(62), С. 110-114.
3. Ламанов С.Л., Михайлова Л.Ф., Яковенко В.В., Комісаренко О.І. Вплив форми кривої спадання струму на енерговиділення у комутуючому елементі. / Вісн. СХУ ім В.Даля - 2006.-№9(103), С. 277-230.
4. Комісаренко О.І., Ламанов С.Л. Оптимізація надходження у вимикаємий контур енергії від джерела живлення. / Вісн. СХУ ім В.Даля. – 2007.- №11(117) Ч.1, С. 80-86.