

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОГО ДЖЕРЕЛА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Федий В.С., д.т.н.

Інститут електродинаміки НАНУ

Грудська В.П., доц., Чибеліс В.І., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вещиков Г.В., студент, Зінченко О.Ю., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. У системах електропостачання промислових підприємств практично не існує стаціонарного режиму через неперервну зміну активних і реактивних навантажень. Передача реактивної потужності Q від енергосистеми до навантаження зменшує пропускну спроможність елементів системи електропостачання та спричиняє появу в них додаткових активних втрат. Ефективним засобом компенсації реактивних навантажень і підвищення пропускну здатності електричних мереж є використання джерел реактивної потужності (ДРП) [1,2]. Найбільш перспективними вважаються вентильні ДРП, оскільки їх потужність можна регулювати у певному діапазоні $D = Q_{\max} / Q_{\min}$, який залежить від типу ДРП. На даний час як ДРП широко використовують: випрямлячі зі штучною комутацією діодів ($D = 3,3$); випрямлячі зі штучною комутацією тиристорів ($D = 6$); конденсатори з вентильним керуванням ($D = 3,3$). Серед сучасних ДРП слід виділити тиристорне джерело з індуктивним накопичувачем електромагнітної енергії, яке розроблене в ІЕД АНУ. У зазначеному ДРП як накопичувальний елемент використовують трифазний лінійний реактор, а як регулювальний пристрій – тиристорний перетворювач частоти зі штучною комутацією (на рис. 1 показано одну фазу цього пристрою).

Мета роботи: дослідити особливості різних способів регулювання потужності вказаного ДРП і проаналізувати можливості розширення діапазону регулювання.

Результати досліджень. Усі способи регулювання потужності досліджуваного ДРП зводяться до регулювання потужності реактора. Відомо, що потужність однієї фази реактора описується виразом $Q_L = U_0^2 / \omega_2 L_0$, де ω_2 , U_0 – відповідно частота і діюче значення основної гармоніки напруги, прикладеної до реактора; L_0 – індуктивність фази реактора. З формули випливає, що потужність реактора (відповідно усього ДРП) можна змінювати трьома способами:

- 1) зміною частоти струму в реакторі ($\omega_2 = \text{var}$);
- 2) зміною індуктивності реактора ($L_0 = \text{var}$);
- 3) зміною величини прикладеної до реактора напруги ($U_0 = \text{var}$).

Результати дослідження вказаних способів подано на рис. 2 у вигляді регулювальних характеристик, які побудовано у відносних одиницях.

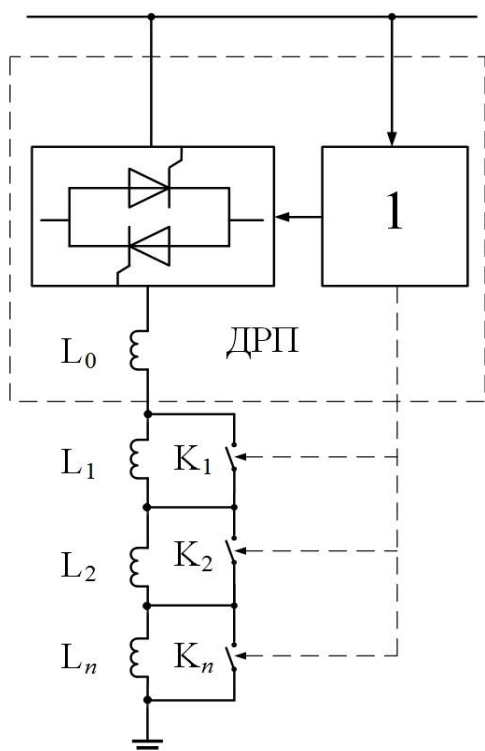


Рисунок 1 – Схема заміщення фази ДРП

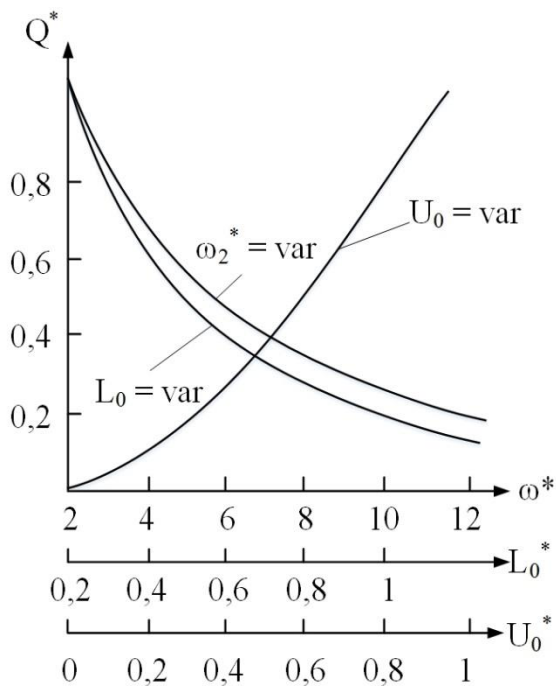


Рисунок 2 – Регулювальні характеристики ДРП

Регулювальна характеристика для першого способу отримана та побудована за умов: $U_0 = const$, $L_0 = const$, $\omega_{2 \min} \leq \omega_2 \leq \omega_{2 \max}$; $\omega_2^* = \omega_2 / \omega_1$; $Q^* = Q / Q_{\min} = \omega_{2 \min} / \omega_2$. Значення $\omega_{2 \max}$ обмежене частотними характеристиками вентилів і втратами у комутаційному вузлі; значення $\omega_{2 \min}$ залежить від максимальної величини реактивної потужності у місці підключення ДРП. При дослідженні було прийнято: $\omega_1 = 2\pi \cdot 50 \text{ рад/с}$; $\omega_{2 \min} = 2\pi \cdot 100 \text{ рад/с}$; $\omega_{2 \max} = 2\pi \cdot 600 \text{ рад/с}$. Вказаний спосіб забезпечує регулювання потужності у діапазоні $D_f = Q_{\max} / Q_{\min} = \omega_{2 \max} / \omega_{2 \min}$, а регулювальна характеристика являє собою гіперболу (рис. 2). З точки зору зменшення масогабаритних показників реактора доцільно вибирати якомога більше значення $\omega_{2 \min}$, але це призводить до зменшення діапазону регулювання D_f .

Регулювальна характеристика для другого способу отримана та побудована за умов: $U_0 = const$, $\omega_2 = const$, $L_{0 \min} \leq L_0 \leq L_{0 \text{ ном}}$, $L_0^* = L_0 / L_{0 \text{ ном}}$, $Q_0^* = Q / Q_{\min} = L_{0 \min} / L_0$. При дослідженні було прийнято: $L_{0 \text{ ном}}$ – індуктивність реактора за відсутності підмагнічування; $L_{0 \min} = 0,2L_{0 \text{ ном}}$. Даний спосіб дозволяє регулювати потужність у діапазоні

$D_L = L_{0 \text{ ном}} / L_{0 \text{ мин}}$, а регулювальна характеристика також є гіперболою (рис. 2). Варто зазначити, що за такого регулювання зручно використовувати керований реактор з обертовим магнітним полем, оскільки в його робочій обмотці проходить синусоїдний струм. Якщо використати керований реактор на підвищеній частоті, то окрім зменшення маси і габаритів можна зменшити втрати енергії на підмагнічування та підвищити швидкодію силової частини ДРП. У такому випадку номінальна потужність ДРП буде відповідати максимальному підмагнічуванню.

Регулювальна характеристика для третього способу регулювання отримана і побудована за умов: $\omega_2 = const$, $L_0 = const$, $0 \leq U_0 \leq U_{0 \text{ ном}}$, $U_0^* = U_0 / U_{0 \text{ ном}}$, $Q^* = (U_0 / U_{0 \text{ ном}})^2$. За такого способу діапазон регулювання $D_U = (U_{0 \text{ ном}} / U_{0 \text{ мин}})^2$, а регулювальна характеристика являє собою квадратичну параболу (рис. 2). Цей спосіб менш придатний, ніж попередні, оскільки при безконтактному регулюванні напруги на реакторі суттєво зростає рівень гармонік у струмі (наприклад, при використанні вентилів силової частини ДРП). Для їх усунення між реактором і силовою частиною ДРП можна підключити будь-який регулятор напруги без спотворення форми. Однак потужність такого регулятора буде сумірною з потужністю реактора, що призведе до погіршення техніко-економічних показників ДРП.

Розширити діапазон регулювання потужності даного ДРП можливо шляхом підключення послідовно з основним реактором L_0 одного або кількох додаткових реакторів $L_1 \dots L_n$ малої потужності (рис. 1). Розглянемо простіший випадок, коли є один додатковий реактор L_1 . Пристрій працює так: при зміні навантаження в межах зони регулювання D_0 за допомогою системи керування змінюють частоту струму в основному реакторі L_0 , при цьому додатковий реактор L_1 зашунтований ключем K_1 . Припустимо, що навантаження суттєво зменшилось; відповідно має бути знижена генерована (споживана) потужність ДРП. Регулювання потужності здійснюється шляхом збільшення частоти ω_2 в основному реакторі L_0 (верхня частина регулювальної характеристики на рис. 3). У момент, коли частота досягає максимального значення $\omega_{2 \text{ max}}$, яке залежить від технічних характеристик ДРП, вимикається ключ K_1 (точка А на рис. 3). Одночасно з вимиканням K_1 частота струму ω_2 стрибком зменшується до значення $\omega_{2 \text{ мин}}$. Далі зниження потужності ДРП здійснюється, як і раніше, шляхом збільшення частоти від $\omega_{2 \text{ мин}}$ до $\omega_{2 \text{ max}}$ струму, через послідовно з'єднані реактори $L_0 - L_1$ (нижня частина регулювальної характеристики на рис. 3, де $\omega^* = \omega_2 / \omega_{2 \text{ мин}}$, $Q^* = Q / Q_{\text{мин}}$).

Аналіз показав, що результуючий діапазон регулювання D_Σ дорівнює квадрату діапазону регулювання з основним реактором:

$D_{\Sigma} = D_0^2 = (\omega_{2 \max} / \omega_{2 \min})^2$. Як приклад на рис. 3 зображено регулювальну характеристику ДРП з розширеним діапазоном для $D_0 = 3$, $D_{\Sigma} = 9$. Індуктивність L_1 додаткового реактора визначається з умови незмінності потужності ($Q \propto 1/\omega_2 L$) у момент вимикання ключа K_1 : $(L_0 + L_1) / L_0 = \omega_{2 \max} / \omega_{2 \min} = D_0$, звідки $L_1 = L_0(D_0 - 1)$. Потужність S_{L_1} додаткового реактора залежить від потужності S_0 основного реактора. Напруга, прикладена до реактора L_1 при вимиканні ключа K_1 , визначається відношенням $L_1 / (L_0 + L_1)$, а струм $I_{L_1} = I_0$ зворотно-пропорційний сумарній індуктивності $L_0 + L_1$, тому $S_{L_1} = U_{L_1} I_{L_1} = \frac{D_0 - 1}{D_0} U_0 \cdot \frac{1}{D_0} I_0 = \frac{D_0 - 1}{D_0^2} S_0$.

Потужність ключа S_{K_1} розраховується як добуток струму, що проходить через ключ у ввімкнутому стані ($I_{K_1} = I_0$), та напруги, яка прикладена до ключа у вимкненому стані ($U_{K_1} = U_{L_1}$): $S_{K_1} = U_{K_1} I_{K_1} = U_{L_1} I_0 = \frac{D_0 - 1}{D_0} U_0 I_0 = \frac{D_0 - 1}{D_0} S_0$.

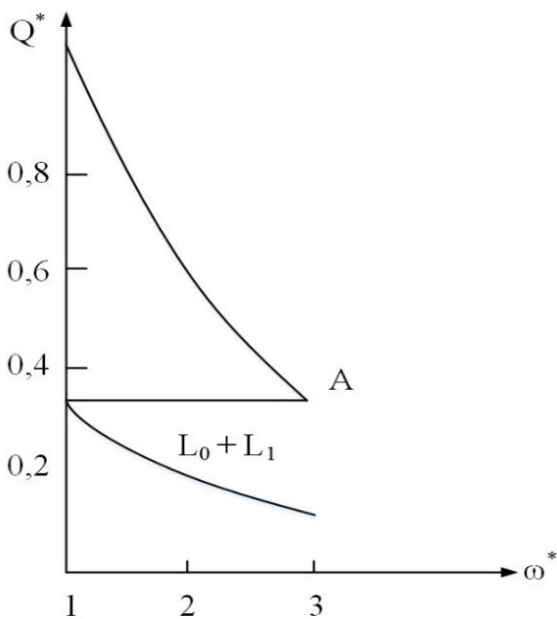


Рисунок 3 – Регулювальна характеристика ДРП з додатковим реактором

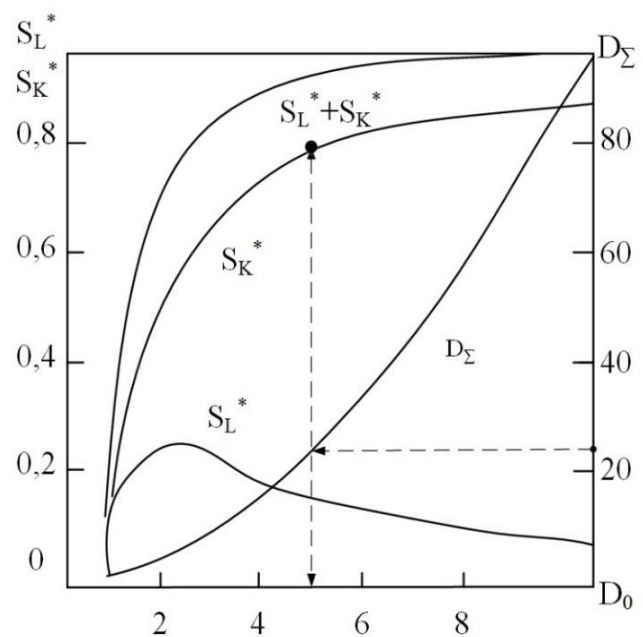


Рисунок 4 – Залежність потужностей додаткових елементів ДРП від діапазону регулювання

Сумарна потужність додаткового обладнання $S_{L_1} + S_{K_1} = \frac{D_0^2 - 1}{D_0^2} S_0$.

На рис. 4 показано залежності D_{Σ} , $S_L^* = S_L / S_0$, $S_K^* = S_K / S_0$, $(S_L^* + S_K^*) / S_0$ як функції діапазону регулювання D_0 основним реактором, а

також проілюстровано графічний метод визначення S_L^* , S_K^* для отримання розширеного діапазону регулювання, наприклад, $D_\Sigma = 25$. З рис. 4 видно, що потужність додаткового реактора $S_L = 0,16$, потужність ключа $S_K = 0,8$ від потужності S_0 основного реактора. Отже, при розширенні діапазону регулювання від 5 до 25 сумарна потужність додаткового обладнання $S_L + S_K = 0,96S_0$.

Необхідне число додаткових реакторів і тип ключів вибирають на підставі технічних вимог до ДРП. У загальному випадку послідовно з основним можна підключити n додаткових реакторів, тоді результуючий діапазон регулювання $D_\Sigma = D_0^{n+1}$. Визначити індуктивність L_i кожного додаткового реактора в залежності від індуктивності основного реактора можна з наступних міркувань. При розмиканні ключів $K_1, K_2 \dots K_n$ (рис. 1) результуюча індуктивність на виході ДРП є сумою індуктивностей $i - 1$ та i -го реакторів. Беручи до уваги вираз $L_1 = L_0(D_0 - 1)$, можна записати $L_i = L_0(D_0^i - D_0^{i-1})$, де $1 < i < n$, або у відносних одиницях $L_i^* = D_0^i - D_0^{i-1}$. Сумарні потужності додаткових реакторів і ключів у відносних одиницях описуються виразами:

$$S_L^* = \sum_{i=1}^n U_{L_i} I_{L_i} = \sum_{i=1}^n \frac{D_0 - 1}{D_0^{i+1}}; \quad S_K^* = \sum_{i=1}^n U_{K_i} I_{K_i} = \sum_{i=1}^n \frac{D_0^i - D_0^{i-1}}{D_0^i} = n \frac{D_0 - 1}{D_0}.$$

Висновки:

1. Розглянутий ДРП має більші регулювальні можливості, ніж аналогічні пристрої, зокрема, різні типи випрямлячів зі штучною комутацією.
2. Найбільш зручним і економічним способом регулювання потужності ДРП є зміна частоти струму в реакторі.
3. Шляхом підключення послідовно з основним реактором n додаткових реакторів можна розширити діапазон регулювання від D_0 до D_0^{n+1} .
4. Якщо діапазон регулювання з основним реактором $D_0 \geq 4$, то сумарна потужність додаткового обладнання мало залежить від D_0 .

Перелік посилань

1. Федий В.С., Намесник С.Г. Трехфазный вентильно-реакторный источник реактивной мощности. // Техн. электродинамика. – 2007. - №6. – С. 36-38.
2. Шидловський А. К., Федий В. С. Электрические цепи с вентильными коммутаторами. – К.: Арпринт, 2010. – 266 с.