

УДК 621.316

М. И. Бурбело, д. т. н., проф.; А. В. Гадай; А. Н. Кравец; М. В. Никитенко**ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Предложены структурные схемы и сформулирован закон управления системой динамической компенсации реактивной мощности по возмущению, предназначенной для компенсации реактивной мощности при пуске крупных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: *компенсация реактивной мощности, пуск двигателей, управление по возмущению.*

Рассмотрение проблемы

Работа электроприводов во время их пуска и в резко переменных режимах характеризуется значительным потреблением реактивной мощности, которое в некоторых случаях превышает потребление активной мощности. Пусковые токи мощных асинхронных двигателей (АД) обуславливают посадку напряжения в узле сети. Это, в свою очередь, приводит к снижению запаса устойчивости узлов нагрузки. Одним из эффективных мер повышения уровня напряжения во время переходных режимов является быстродействующая (динамическая) компенсация реактивной мощности.

Обоснование результатов

Рассмотрим два варианта реализации систем динамической компенсации реактивной мощности электроприводов с использованием статического тиристорного компенсатора (СТК) (рис. 1), где обозначены: трехфазный источник (ТИ), электропривод (ЭП), блок тиристорно-регулируемых реакторов, состоящий из реакторов L_1, L_2, L_3 и включенных встречно-параллельно тиристорам $VT_{11}, VT_{12}, VT_{21}, VT_{22}, VT_{31}, VT_{32}$, батарея конденсаторов C_1, C_2, C_3 . Управление СТК осуществляется с помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ). Информация о нагрузках на ее входы поступает с выходов измерительного канала (ИК), который, в свою очередь, присоединен через измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) к линии питания ЭП.

Система динамической компенсации реактивной мощности (рис. 1а) обеспечивает управление по возмущению, а система (рис. 1б) – по отклонению. Система с управлением по возмущению (рис. 1а) характеризуется более высоким быстродействием, однако для ее построения необходимо выбрать информативные параметры и получить регулировочные характеристики СТК.

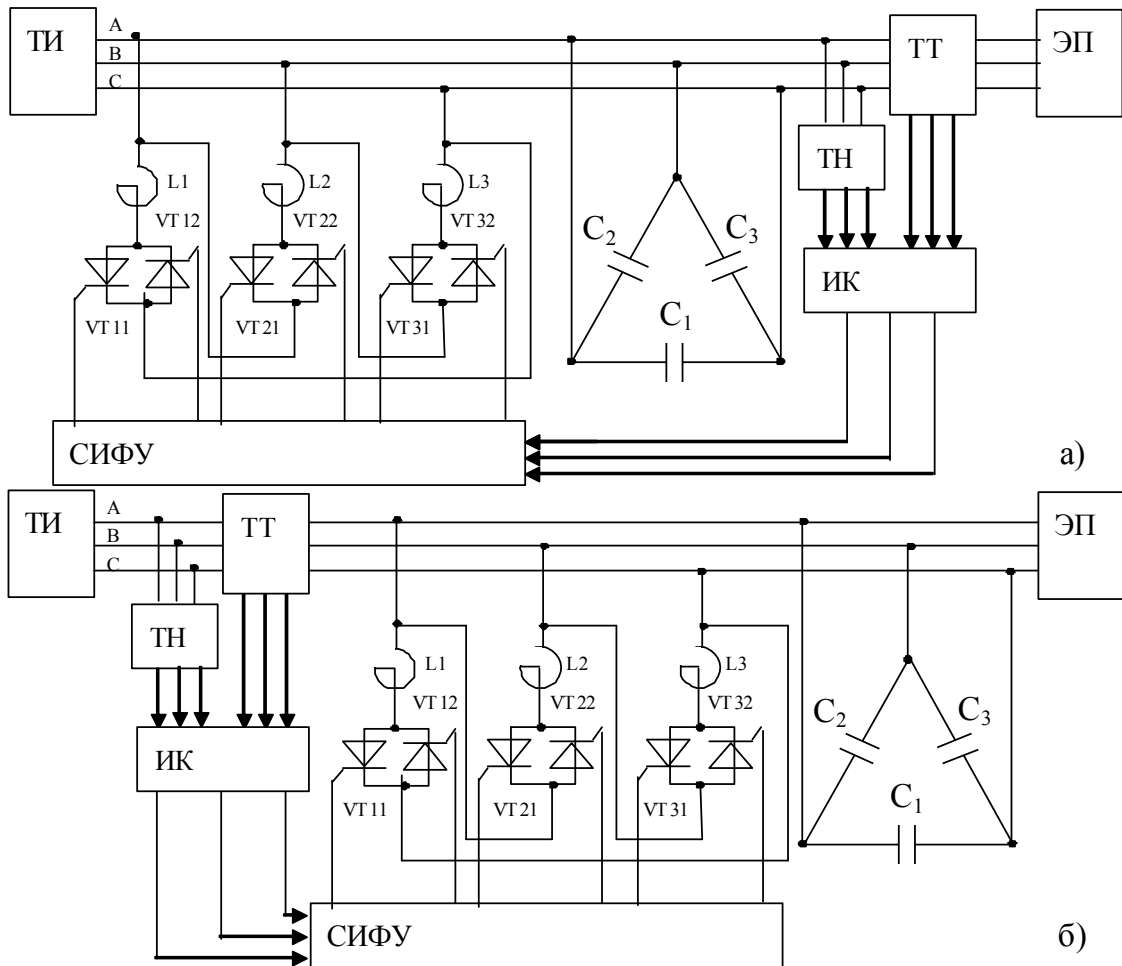


Рис. 1. Схемы динамической компенсации реактивной мощности электроприводов с помощью СТК

Рассмотрим вопрос о выборе информативных параметров для управления СТК по возмущению. В [1 – 3] с целью анализа энергетических процессов во время переходных процессов электроприводов введены понятия текущих значений активной и реактивной составляющих спектрального сопротивления и проводимости

$$R_C(t) = \frac{P(t)}{I^2(t)}; \quad X_C(t) = \frac{Q(t)}{I^2(t)}; \quad g_C(t) = \frac{P(t)}{U^2(t)}; \quad b_C(t) = \frac{Q(t)}{U^2(t)}, \quad (1)$$

а также спектральной проводимости, для определения которой использованы условия эквивалентности между составляющими спектрального сопротивления и проводимости:

$$g_K(t) = \frac{R_C(t)}{R_C^2(t) + X_C^2(t)}; \quad b_K(t) = \frac{X_C(t)}{R_C^2(t) + X_C^2(t)}. \quad (2)$$

В случае управления с соблюдением условия $b_K(t) = 0$ генерируется реактивная мощность $Q_K(t) = b_K(t)U^2(t)$. Учитывая, что $b_K(t) = \frac{Q(t)}{P^2(t) + Q^2(t)} I^2(t)$, получим

$$Q_K(t) = Q(t) \frac{S^2(t)}{P^2(t) + Q^2(t)}.$$

Поскольку в условиях несинусоидальности напряжения питания или нелинейности цепи намагничивания АД $S^2(t) \geq P^2(t) + Q^2(t)$, то динамическая компенсация реактивной мощности по критерию $b_K(t) = 0$ обеспечивает более высокую степень компенсации по сравнению с управлением по критерию $b_C(t) = 0$: $Q_K(t) \geq Q(t)$. Электромагнитный

момент АД в условиях несинусоидальности падает, а поэтому применение этого критерия приводит к повышению устойчивости узла нагрузки. Вместе с тем, в условиях, когда несинусоидальность напряжения питания или нелинейность АД незначительны, оба критерия обеспечивают одинаковый уровень компенсации.

Перейдем к рассмотрению регулировочных характеристик СТК. В СТК со схемой соединения тиристорно-регулируемых реакторов (ТРР) в „треугольник” ток через битиристорный ключ в каждой фазе не зависит от тока других фаз. Поэтому свойства и энергетические характеристики СТК можно получить, рассматривая однофазный ТРР [4, 5].

Каждая фаза компенсатора содержит реактор с индуктивностью L_p и активным сопротивлением R_p , и битиристорный ключ, сопротивление которого равно нулю. Выражение для мгновенного тока ТРР можно получить из решения дифференциального уравнения

$$U_m \cdot \cos(\omega t + \gamma) = i \cdot R_p + \omega L_p \frac{di}{d\omega t}, \quad (3)$$

где U_m – амплитудное значение линейного напряжения сети; γ – угол открытия тиристоров, которое справедливо для тока через тиристор в интервале $\gamma \leq \omega t \leq \gamma_e$, γ_e – угол закрытия тиристоров, соответствующий нулевому значению тока.

Решая дифференциальное уравнение (3) с учетом начальных условий $\omega t = \gamma$, $i = 0$, получим выражение для мгновенного тока через ТРР, которое справедливо для тока через тиристор в интервале $\gamma \leq \omega t \leq \gamma_e$:

$$i(\omega t) = I_m \cdot \left[\cos(\omega t - \varphi) - \cos(\gamma - \varphi) \cdot e^{-\frac{\omega t - \gamma}{\omega \tau_p}} \right], \quad (4)$$

где $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_p^2 + (\omega \cdot L_p)^2}}$ – амплитуда тока через реактор при $\gamma = 0$;

$\varphi = \arctg \frac{\omega L_p}{R_p}$ – угол сдвига фаз основной гармоники тока через реактор;

$\tau_p = \frac{L_p}{R_p}$ – постоянная времени реактора.

Поскольку ТРР в общем случае является преимущественно индуктивной нагрузкой ($\varphi \approx 90^\circ$), то форма тока в ТРР при увеличении угла включения γ , отсчитываемого от максимального значения линейного напряжения, уменьшает свою амплитуду, практически не изменяя фазовый сдвиг (рис. 2). После включения тиристора ток через ТРР протекает на протяжении интервала времени, не превышающего половину периода. Угол закрытия тиристоров γ_e может быть определен из уравнения

$$\cos(\gamma_e - \varphi) - \cos(\gamma - \varphi) \cdot e^{-\frac{\gamma_e - \gamma}{\omega \tau_p}} = 0,$$

которое получено из (4) при условии $i = 0$ при $\omega t = \gamma_e$.

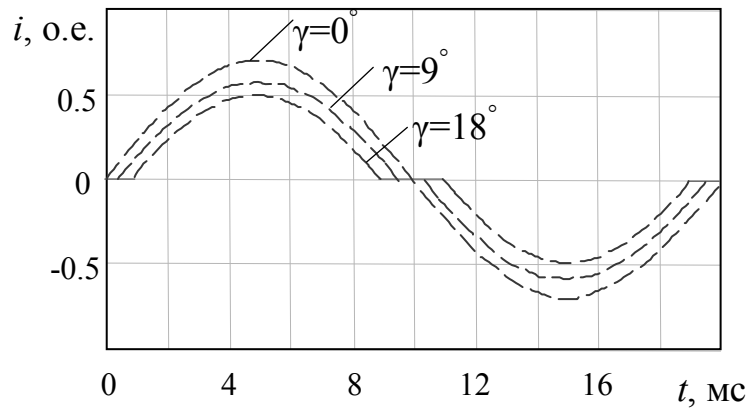


Рис. 2. Зависимости тока ТРР в функции угла γ

Для получения регулировочной характеристики $Q_{\text{СТК}}(\gamma)$ рассмотрим аналитические зависимости для тока ТРР, который имеет реактивный характер. Зависимость амплитудного значения тока ТРР от угла γ можно получить из выражения (4), подставив $\omega t = \varphi$:

$$I_m(\gamma) = I_m(0) \cdot \left[1 - \cos(\gamma - \varphi) \cdot e^{-\frac{\varphi - \gamma}{\omega \tau_p}} \right]. \quad (5)$$

Зависимость $I_m(\gamma)$ изображена на рис. 3 (кривая 1). Для сравнения на этом же рисунке изображена экспериментально снятая зависимость амплитуды первой гармоники $\tilde{I}_{1m}(\gamma)$ тока ТРР (кривая 2). Зависимость амплитуды первой гармоники $\tilde{I}_{1m}(\gamma)$ (кривая 2) тока ТРР проходит значительно ниже по сравнению с теоретической зависимостью амплитудного значения несинусоидального тока $I_m(\gamma)$ (кривая 1), что можно объяснить наличием высших гармоник.

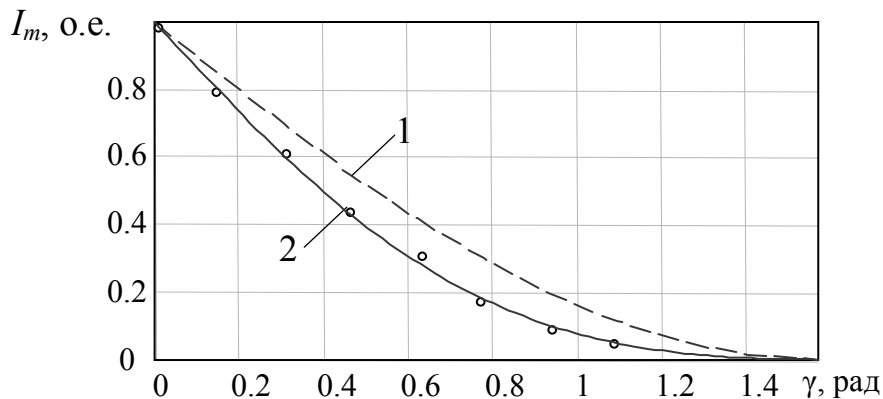


Рис. 3. Зависимости амплитудных значений несинусоидального тока (кривая 1) и его первой гармоники (кривая 2) через ТРР

В таблице приведены экспериментальные данные амплитудных значений тока ТРР $\tilde{I}_m(\gamma)$, которые незначительно отличаются от теоретических $I_m(\gamma)$. Здесь также приведены экспериментальные данные амплитудных значений первой гармоники тока ТРР $\tilde{I}_{1m}(\gamma)$, а также высших гармоник $\tilde{I}_{vm}(\gamma)$, имеющих реактивный характер.

Данные амплитудных значений тока через ТРР

γ	0°	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°
$I_m(\gamma)$	1	0,844	0,692	0,548	0,414	0,295	0,193	0,110
$\tilde{I}_m(\gamma)$	1	0,839	0,693	0,538	0,405	0,293	0,186	0,107
$\tilde{I}_{1m}(\gamma)$	0,986	0,790	0,604	0,436	0,293	0,179	0,096	0,042
$\tilde{I}_{3m}(\gamma)$	0	-0,065	-0,113	-0,136	-0,131	-0,105	-0,069	-0,035
$\tilde{I}_{5m}(\gamma)$	0	-0,036	-0,051	-0,037	-0,006	0,021	-0,031	-0,024
$\tilde{I}_{7m}(\gamma)$	0	-0,024	-0,021	0,002	0,020	0,015	-0,002	-0,012
$\tilde{I}_{9m}(\gamma)$	0	-0,016	-0,005	0,013	0,008	-0,007	-0,009	0,002
$\tilde{I}_{11m}(\gamma)$	0	-0,011	0,003	0,009	-0,005	-0,006	0,005	0,003
$\tilde{I}_{13m}(\gamma)$	0	-0,001	0,006	0,001	-0,006	0,004	0,002	-0,004

Анализ этих данных показывает, что с увеличением угла γ реактивный ток основной гармоники ТРР уменьшается. Вместе с тем, с увеличением угла γ появляются реактивные составляющие тока на высших гармониках. Наибольшим является амплитудное значение третьей гармоники тока, которое достигает своего максимума при угле $\gamma \approx 30^\circ$. Однако, учитывая, что третья гармоника тока замыкается в треугольнике ТРР, влияние высших гармонических составляющих будет менее существенным, поскольку амплитуда пятой гармоники составляет 5,1 % от основной гармоники при угле 18° , а амплитуда седьмой гармоники не превышает 2,4 %.

Поскольку высшие гармоники напряжения питания равны нулю, то на высших гармониках реактивная мощность не потребляется. Поэтому реактивная мощность будет определяться реактивной составляющей основной гармоники тока

$$Q = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = U \cdot I_{1p}.$$

Аналитическую зависимость амплитудных значений основной гармоники тока $I_{1m}(\gamma)$, имеющей реактивный характер, можно получить из выражения для тока (4), разлагая его в ряд Фурье [6]

$$I_{1m}(\gamma) \approx \frac{I_m(0)}{\pi} \cdot [(\pi - 2\gamma) - \sin(\pi - 2\gamma)].$$

Итак, регулировочная характеристика реактивной мощности СТК может быть представлена в виде

$$Q_{СТК}(\gamma) = F(\gamma) = Q_{KV} - Q(\gamma) = Q_{KV} - \frac{Q(\gamma=0)}{\pi} \cdot [(\pi - 2\gamma) - \sin(\pi - 2\gamma)].$$

Таким образом, закон управления СТК для системы динамической компенсации реактивной мощности по возмущению (рис. 1а) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} Q_{СТК}(t) &= b_C(t)U^2(t); \\ \gamma(t) &= F^{-1}(Q_{СТК}(t)). \end{aligned} \quad (6)$$

Для реализации обратной нелинейной зависимости F^{-1} можно использовать функциональный преобразователь.

Выводы

Предложены структурные схемы систем динамической компенсации реактивной мощности по возмущению и по отклонению. Сформирован закон управления системой динамической компенсации реактивной мощности по возмущению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурбело М.Й. Підвищення ефективності електроспоживання асинхронних двигунів у перехідних режимах / М.Й. Бурбело, А.В. Гадай // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 3. – С. 57 – 58.
2. Бурбело М.Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М.Й. Бурбело, А.В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65 – 68.
3. Бурбело М.Й. Аналіз асинхронних двигунів в перехідних режимах з використанням спектральних параметрів / М.Й. Бурбело, А.В. Гадай // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – Вип. 4 (51), ч. 1. – С. 150 – 154.
4. Петухов М.В. Дослідження математичної моделі параметричного статичного компенсатора реактивної потужності / М.В. Петухов, А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк // Вісник НУ „Львівська політехніка”. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2001. – № 421. – С. 154 – 159.
5. Петухов М.В. Інтегральні показники енергетичного процесу тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні від мережі обмеженої потужності / М.В. Петухов, Ю.В. Грицюк, А.В. Гадай // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь: ПДТУ, 2005. – С. 100 – 104.
6. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р.М. Матура. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.

Бурбело Михаил Иосифович – заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.
Винницкий национальный технический университет.

Гадай Андрей Валентинович – ассистент кафедры электроснабжения Луцкого национального технического университета.
Луцкий национальный технический университет.

Кравец Александр Николаевич – ассистент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента,

Никитенко Максим Васильевич – студент Института электроэнергетики и электромеханики,
Винницкий национальный технический университет.