

## СПОСОБЫ ВЕКТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

*В.И. Сафонов, В.Д. Константинов*

Рассмотрено несколько способов векторного регулирования параметрического источника тока. В каждом варианте выполнена оценка мощности дополнительного источника, необходимого для поддержания тока активной нагрузки при изменении напряжения сети. Показано, что введение регулирующих источников в ветви с реактивными элементами позволяют более эффективно и позволяет осуществить регулирование только за счет перераспределения реактивной мощности между элементами схемы.

Ключевые слова: векторное регулирование, параметрический источник тока.

Параметрические источники тока (ПИТ) используются в системах электроснабжения многих технологических установок [1], таких как электролизные установки, дуговые вакуумные печи и т.д., в которых требуется неизменный по величине ток при изменяющемся в небольшом диапазоне  $0.8R_n < R < 1.2R_n$  сопротивлении нагрузки, где  $R_n$  – номинальное сопротивление нагрузки. Поддержание необходимой величины тока при изменении напряжения сети в таких системах осуществляется путем механического переключения отпаек обмотки высшего напряжения (РПН и ПБВ) силовых трансформаторов. Эти способы регулирования напряжения обладают рядом недостатков, таких как дискретность регулирования, износ трансформаторного масла и механических контактов и т.п. В работе [2] регулирование выполнено путем механического переключения отпаек реактора в ПИТ, что сохраняет указанные выше недостатки.

Альтернативным способом регулирования является введение в систему электроснабжения дополнительных источников, выполненных на основе активных преобразователей с ШИМ и звеном постоянного напряжения [3]. В ПИТ (рис. 1) может рассматриваться несколько вариантов введения дополнительных источников, обеспечивающих сохранение тока при изменении напряжения сети.

Номинальным режимом работы ПИТ является режим, в котором обеспечивается наименьшая реактивная мощность элементов. Режим реализуется, если нулевая точка нагрузки  $O_1$  располагается на топографической диаграмме посередине отрезка  $BC$ . В этом режиме активная мощность в  $2\sqrt{3}$  раз выше реактивной мощности катушки (конденсатора). В дальнейшем все мощности будем нормировать на величину активной мощности нагрузки в номинальном режиме. Условие  $X_L = X_C$  позволяет сохранять действующее значение тока активной нагрузки при изменении сопротивления нагрузки.

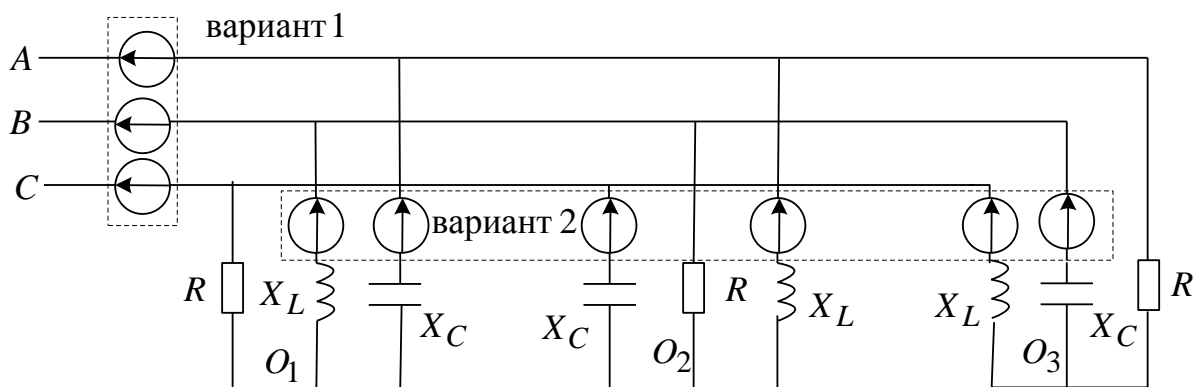


Рис. 1. Схема ПИТ с дополнительными регулирующими источниками

Если установить дополнительный источник на входе ПИТ (вариант 1), то мощность источника, необходимая для регулирования составляет:

$$dP(k_U, k_R) = k_U (1 + k_R),$$

где  $k_U = dU / U_n$  – относительное изменение напряжения сети,  $k_R = dR / R_n$  – относительное изменение сопротивления нагрузки,  $U_n$  и  $R_n$  – номинальные значения напряжения сети и сопротивления нагрузки.

Дополнительный источник будет потреблять активную мощность при уменьшении напряжения сети ниже номинального значения, и выдавать активную мощность при увеличении напряжения сети. Обмен активной мощностью может осуществляться со звеном выпрямленного напряжения [4] (например, в установке электролиза). Активная мощность может также передаваться во второй активный преобразователь, имеющий одно звено

постоянного напряжения с первым преобразователем [3]. В этом случае суммарная мощность активных преобразователей повышается в 2 раза.

Если установить дополнительные источники в ветви ПИТ с реактивными элементами (вариант 2), то для осуществления регулирования необходима мощность:

$$dQ(k_U, k_R) = \frac{k_U}{\sqrt{3}} \left( 1 + 3 \left( \frac{k_R - k_U}{1 + k_U} \right)^2 \right).$$

Каждый из дополнительных источников работает как «наведенный» индуктивный или емкостный элемент. При соблюдении условия  $X_L = X_C$  для эквивалентных сопротивлений ветвей поддержание действующего значения тока нагрузки осуществляется при изменении активного сопротивления нагрузки. Таким образом, вариант 2 можно рассматривать как векторно-параметрическое регулирование в системе электроснабжения, при котором поддержание необходимого режима осуществляется за счет изменения параметров реактивных элементов. Мощность дополнительных источников реактивная, поэтому звено для передачи активной мощности не требуется. Регулирование осуществляется только за счет перераспределения реактивной мощности между элементами системы. Конструктивно источники можно выполнить с двумя активными выпрямителями и одним общим (или двумя отдельными) звеньями постоянного напряжения.

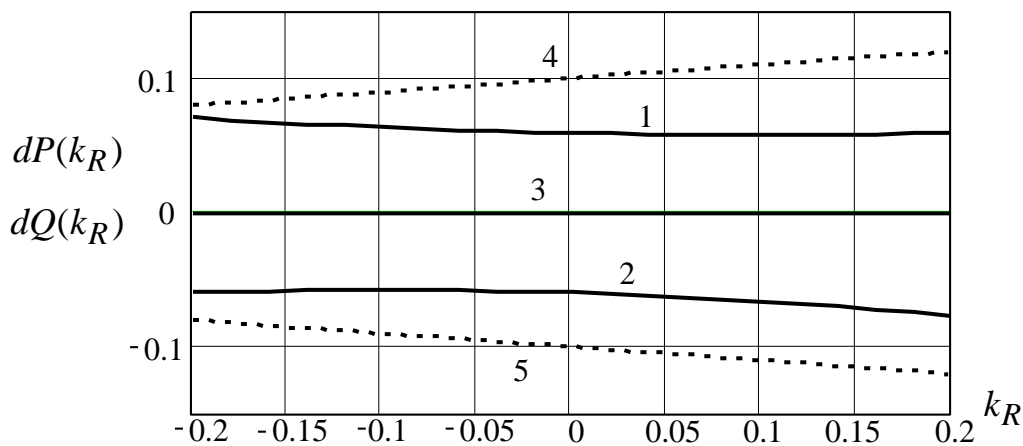


Рис. 2. Нормированные мощности дополнительных активных преобразователей в зависимости от относительного сопротивления сети: 1 – для варианта 2 и  $k_U = 0.1$ ; 2 – для варианта 2 и  $k_U = -0.1$ ; 3 – для вариантов 1 и 2 и  $k_U = 0$ ; 4 – для варианта 1 и  $k_U = 0.1$ ; 5 – для варианта 1 и  $k_U = -0.1$

Сравнение мощностей дополнительных источников выполнено на рис. 2. Диапазон изменения параметра  $k_U$  принят равным от  $-0,1$  до  $0,1$ , исходя из нормативных требований по качеству электрической энергии [5].

Из рис. 2 следует, что мощность активного преобразователя в варианте 1 больше суммарной мощности активных преобразователей в варианте 2 во всем диапазоне регулирования. Таким образом, номинальная мощность активных преобразователей в варианте 2 меньше, чем в варианте 1.

При наличии в системе электроснабжения с ПИТ выпрямительных блоков изменение эквивалентных параметров элементов ПИТ неизбежно будет сказываться на моментах включения вентиля и, как следствие, внешних характеристиках выпрямителя. Добавочные сопротивления в ветвях ПИТ  $dx = X_L k_U$  и согласно [5] не превышают 10 % от номинального значения. Такие изменения параметров несущественно скажутся на характеристиках выпрямителя. Однако, этот вопрос требует дополнительного исследования.

Регулирование ПИТ может осуществляться путем введения дополнительных источников только в ветви с индуктивностями. При этом условие  $X_L = X_C$  для эквивалентных сопротивлений ветвей будет нарушаться. Подбором величины добавочного сопротивления можно добиться неизменной величины тока нагрузки, аналогично рассмотренному в [2] варианту с механическим переключением отпаек. Мощность дополнительного источника в этом случае будет сравнима с суммарной мощностью источников в ветвях с реактивными элементами, показанной на рис. 2. Для мощных энергетических установок допустимая мощность, проходящая через вентиляльные ключи активных преобразователей, ограничена, поэтому разделение системы управления на два активных преобразователя меньшей мощности предпочтительнее.

#### Библиографический список

1. Миронов, Ю.М. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок: учебное пособие для вузов / Ю.М. Миронов, А.Н. Миронова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 376 с.
2. Виноградов, А.В. Возможности улучшения энергетических показателей мощных преобразовательных подстанций электролиза алюминия за счет применения вольтодобавочного параметрического источника тока / А.В. Виноградов, В.И. Суров // Техничко-экономический вестник РУСАЛа. – 2007. – Вып. 21. – С. 24–26.
3. Бурман, А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
4. Хохлов, Ю.И. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ. / Ю.И. Хохлов, Д.В. Гиззатуллин, А.Г. Осипов // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – Вып. 11. – С. 32–38.

Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции  
Секции технических наук

5. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.