

Регулирование реактивной мощности конденсаторных батарей

Предлагается алгоритм и регулятор для управления реактивной мощностью конденсаторной батареи с секциями различной мощности, позволяющий повысить плавность регулирования при ограниченном числе коммутационной аппаратуры. Плавность регулирования мощности конденсаторной батареи требует малой и стабильной зоны нечувствительности, что достигается применением методов цифровой обработки информации. Зона нечувствительности регулятора может быть симметричной либо смещенной в область потребления или генерирования реактивной мощности.

Пропонується алгоритм та регулятор для керування реактивною потужністю конденсаторної батареї з секціями різної потужності, який дозволяє підвищити плавність регулювання при обмеженій кількості комутаційних апаратів. Плавність регулювання потужності конденсаторних батарей потребує малої та стабільної зони нечутливості, що досягається застосуванням методів цифрової обробки інформації. Зона нечутливості регулятора може бути симетричною або зміщеною в область споживання чи генерування реактивної потужності.

Характер и величина реактивной мощности в нагрузочном узле энергосистемы не остаются постоянными вследствие включения или отключения различных потребителей. Включением или отключением ступеней конденсаторных батарей (КБ) можно дискретно регулировать реактивную мощность нагрузочного узла. Для более точной компенсации реактивной мощности до заданного значения необходимо увеличивать число ступеней КБ, что будет эффективнее, если использовать КБ с секциями неравной мощности и автоматический регулятор реактивной мощности КБ со сложным законом управления, так как при этом сокращается число коммутационной аппаратуры в компенсирующей установке.

Известный регулятор реактивной мощности КБ Б2201 (Рига) имеет программатор, реализующий код работы 1:1:2:2..., при котором две первые ступени КБ имеют одинаковую мощность, равную половине мощности последующих одинаковых ступеней *). Схема регулятора обеспечивает при включении (отключении) ступени КБ большей мощности отключение (включение) ступени меньшей мощности, за счет чего достигается увеличение числа ступеней регулирования реактивной мощности при том же числе коммутационных аппаратов.

Эти регуляторы выпускаются для работы с КБ, имеющими 6 или 9 ступеней, т.е. управляют 6 или 9 коммутационными аппаратами, обеспечивая при этом число ступеней регулирования реактивной мощности

$$K = N_1 + 2N_2 = 2(N_\Sigma - 1),$$

где $N_1 = 2$ — число ступеней КБ с меньшей мощностью; $N_2 = 1, 2, 4$ или 7 — число ступеней КБ с большей мощностью (устанавливается перемычкой на плате программатора); $N_\Sigma = N_1 + N_2 = 3, 4, 6$ или 9 — общее число секций КБ или число коммутационных аппаратов.

Таким образом, регулятор Б2201 может управлять КБ с числом ступеней неравной мощности $N_\Sigma = 3, 4, 6$ или 9 и обеспечивает соответственно число ступеней регулирования реактивной мощности $K = 4, 6, 10$ или 16 .

Недостатками этого регулятора являются малое число ступеней КБ меньшей мощности и, следовательно, относительно малое число ступеней регулирования реактивной мощности при заданном числе коммутационных аппаратов, сложность принципиальной схемы и ее наладки, а также низкая точность регулирования из-за аналоговой обработки информации о токе и напряжении нагрузочного узла.

Регулятор реактивной мощности КБ типа РРМ-1^{*)} (Киев) также предназначен для управления КБ с секциями неравной мощности. Он обеспечивает отключение половины ступеней КБ меньшей мощности при включении очередной ступени КБ большей мощности, а также последовательное отключение сначала ступеней конденсаторной батареи меньшей мощности и затем ступеней КБ большей мощности.

Используемый в регуляторе РРМ-1 алгоритм управления ступенями N_1 КБ меньшей мощности и N_2 КБ большей мощности позволяет иметь число ступеней регулирования реактивной мощности

$$K = N_1 + N_1 N_2 / 2,$$

© Кравченко Ю.И., Кувда В.П., Олексенко В.Г., 1996

*) Богаенко И.Н., Борисенко В.Я., Розинский Д.И., Рюшин Н.А. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности. — К: Техніка, 1992. — 152 с.

т.е. меньшее по сравнению с регулятором Б2201, а именно, для общего числа ступеней КБ меньшей и большей мощности $N_{\Sigma} = N_1 + N_2 = 3, 4, 6$ или 9 соответственно имеем $K = 3, 4, 8$ или 15.

Преимущества предложенного алгоритма управления ступенями конденсаторных батарей начинают проявляться при общем числе коммутационных аппаратов на одну компенсирующую установку $N_{\Sigma} = N_1 + N_2 > 11$, что является технически и экономически нецелесообразным.

Недостатком рассмотренного алгоритма является неравное число ступеней и неравный шаг регулирования при наборе и сбросе мощности КБ, что ведет к лишним коммутациям. Недостатками регулятора РРМ-1 являются также нестабильность зоны нечувствительности, т.е. ее изменение при изменении тока нагрузки, обусловленное принятым способом задания уставки регулирования не по самой реактивной мощности, а по углу сдвига фаз тока и напряжения, излишняя сложность схемы и ее наладки из-за наличия двух каналов обработки сигнала по входному напряжению, отсутствие универсальности из-за невозможности оперативного изменения схемы формирования заданного алгоритма управления ступенями КБ меньшей и большей мощности при изменении их числа, что необходимо для различных условий эксплуатации.

Заманчивым является применение для создания схемы регулятора алгоритма управления и разбивки КБ на секции, основанные на представлении чисел по степеням числа 2. Так, например, если взять мощность первой секции КБ кратной 2^0 , второй секции — 2^1 , третьей секции 2^2 и т.д., то общее число ступеней регулирования будет равно

$$K = 2^0 + 2^1 + 2^2 + \dots,$$

что превышает число ступеней регулирования ранее рассмотренных регуляторов при том же числе коммутационных аппаратов. Например, при четырех секциях КБ с соотношением мощностей 1:2:4:8 получается 15 ступеней регулирования мощности КБ.

Существенным недостатком этого способа является то, что коммутационные аппараты должны быть разнотипными, с различием по мощности при коде регулирования 1:2:4:8 в восемь раз. Кроме того, в моменты изменения мощности КБ будут наблюдаться толчки тока в уставовке, обусловленные кратковременным отключением всех секций КБ и включением следующего требуемого их набора (в рассматриваемом коде 1:2:4:8 эти толчки тока будут обусловлены одновременной коммутацией 7/15 или 8/15 общей мощности КБ). Есть также сложности с подбором единичных конденсаторов, отвечающих принятому закону распределения их мощностей между секциями КБ.

Например, для цехового трансформатора с

номинальной мощностью $S_N = 1000$ кВ·А требуется конденсаторная установка с мощностью около $Q = 500$ квар; при этом распределению мощности по коду 1:2:4:8 будут соответствовать секции КБ минимальной и максимальной мощности в 33 и 267 квар. Единичные низковольтные конденсаторы имеют мощность, не превышающую 75...100 квар, следовательно, секция максимальной мощности должна быть составлена из нескольких параллельно включенных конденсаторов, а это позволяет применить для ее коммутации вместо одного мощного аппарата несколько менее мощных и тем самым снизить число их типов в одной конденсаторной установке. При этом, отказавшись от алгоритма и распределения мощности КБ по степеням двойки, можно снизить и толчки тока, уменьшив мощность одновременно коммутируемых секций КБ.

Авторами в рамках выполнения проектов ГКНТ Украины решалась задача создания автоматического регулятора реактивной мощности с улучшенными технико-экономическими характеристиками, а именно, задача повышения плавности регулирования реактивной мощности узла нагрузки при ограниченном числе ступеней КБ и числе коммутационных аппаратов за счет оптимизации алгоритма управления ступенями КБ меньшей и большей мощности и получения несимметричной относительно нуля зоны нечувствительности для частичной компенсации реактивной мощности силового трансформатора или поддержания необходимого уровня напряжения, а также задача упрощения схемы и настройки регулятора за счет уменьшения числа каналов обработки информации по входному напряжению.

Предлагаемый алгоритм управления ступенями N_1 конденсаторной батареи КБ1 меньшей мощности и ступенями N_2 конденсаторной батареи КБ2 большей мощности рассчитан на то, что реактивная мощность ступени ΔQ_2 КБ2 в $(N_1 + 1)$ раз больше реактивной мощности ступени ΔQ_1 КБ1

$$\Delta Q_2 = (N_1 + 1)\Delta Q_1,$$

и предполагает отключение (включение) всех ступеней КБ1 меньшей мощности при включении (отключении) одной ступени КБ2 большей мощности.

Общее число ступеней регулирования реактивной мощности конденсаторных батарей будет при этом равно

$$K = N_1 + N_1 N_2 + N_2.$$

Оно будет наибольшим, если $N_1 = N_2 = N$, т.е.

$$K_{\max} = 2N + N^2.$$

Общая мощность конденсаторных батарей при этом будет равна

$$\Sigma Q = N_1 \Delta Q_1 + N_2 \Delta Q_2 = (N_1 + N_1 N_2 + N_2) \Delta Q_1$$

или

$$\Sigma Q = (2N + N^2) \Delta Q_1$$

КБ большей мощности может быть высоковольтной или низковольтной, как и КБ меньшей мощности.

На рис. 1 для регулирования, основанного на степенях числа 2, а также регуляторов Б-2201, РРМ-1 и предлагаемого авторами регулятора РКБ-2 показаны зависимости числа ступеней регулирования K реактивной мощности от общего числа

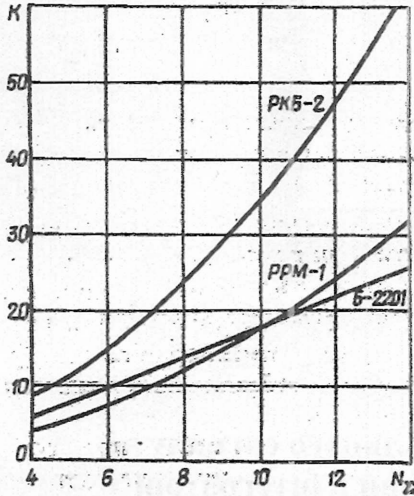


Рис. 1

секций КБ N_2 , т.е. от общего числа коммутационных аппаратов. Из сравнения зависимостей видно, что при одинаковом числе секций N_2 КБ, а значит и числе коммутационных аппаратов, регулятор РКБ-2 позволяет иметь значительно большее число ступеней K , а следовательно и значительно лучшую плавность регулирования реактивной мощности.

Для иллюстрации предлагаемого алгоритма

управления КБ с секциями разной мощности в таблице приведены возможные сочетания числа и мощности ступеней КБ для силовых трансформаторов, применяемых в цеховых ТП. В ней номинальные реактивные мощности соответствуют нагрузке трансформаторов $\beta = 0,75$, принятой для двухтрансформаторных ТП, при среднем коэффициенте мощности потребителей $\cos \varphi = 0,75$. Число ступеней регулирования K и число коммутационных выходов регулятора M выбраны так, чтобы для всех мощностей трансформаторов обойтись наименьшим числом типов единичных конденсаторов. Учитывая, что секции КБ большей мощности набираются из нескольких параллельно соединенных конденсаторов, можно обойтись для всех трансформаторов всего тремя типонами выпускаемых конденсаторов 12,5; 25 и 50 квар. При этом для всех трансформаторов используется один и тот же регулятор с перепаиванием перемычек для согласования его выходов с числом секций меньшей N_1 и большей N_2 мощностей.

S_N , кВ·А	Q_N , квар	ΔQ_1 , квар	ΔQ_2 , квар	Q_{Σ} , квар	N_1	N_2	K	M
250	125	12,5	50	137,5	3	2	11	5
400	200	12,5	50	187,5	3	3	15	6
630	315	25	100	275	3	2	11	5
				375	3	3	15	6
1000	495	25	100	475	3	4	19	7
1600	795	50	200	750	3	3	15	6
2500	1240	50	200	1150	3	5	23	8
				1350	3	6	27	9

На рис. 2 показана структурная схема регулятора РКБ-2, реализующего предлагаемый алгоритм управления секциями КБ, а на рис. 3 — включение регулятора на стороне НН нагрузочно-го узла.

Регулятор содержит фазовращатель 1, компараторы 2 и 3, перестраиваемый преобразователь ток-частота 4, удвоитель частоты импульсов 5, формирователь сигнала по углу φ — 6, формирова-

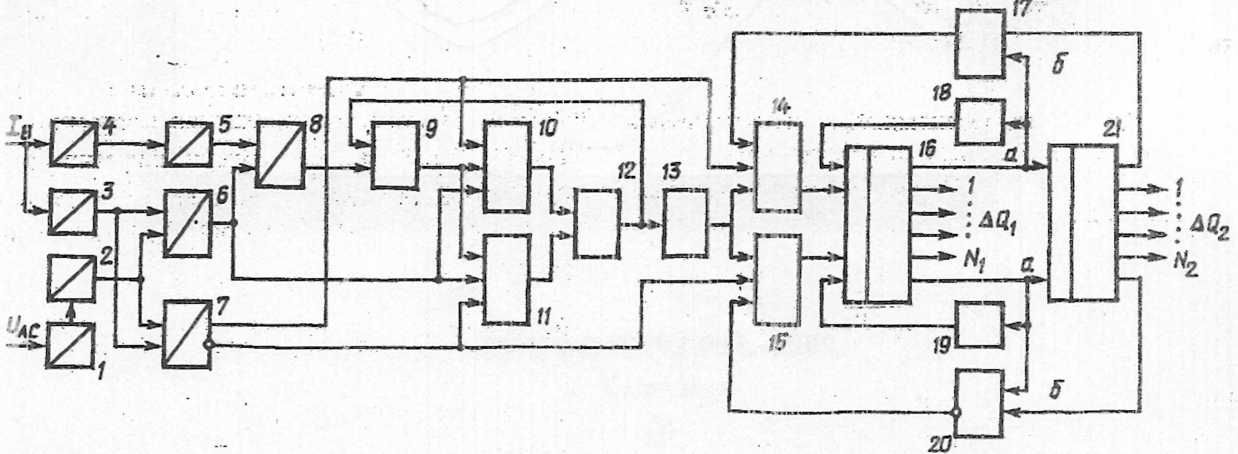


Рис. 2

тель сигналов, определяющих характер реактивной мощности 7, смеситель сигналов 8, цифровой ключ 9, формирователь зоны нечувствительности при индуктивном характере реактивной мощности 10, формирователь зоны нечувствительности при емкостном характере реактивной мощности 11, сумматор сигналов 12, формирователь выдержки времени 13, формирователь сигнала на отключение ступеней КБ 14, формирователь сигнала на включение ступеней КБ 15, блок управления ступенями ΔQ_1 КБ малой мощности 16, формирователь сигнала запрета при отключении всех ступеней КБ 17, формирователь сигнала предварительной установки реверсивного счетчика 18, формирователь сигнала обнуления реверсивного счетчика 19, формирователь сигнала запрета при включении всех ступеней КБ 20 и блок управления ступенями ΔQ_2 КБ большой мощности 21.

На входы регулятора подаются синусоидальные сигналы, снимаемые с трансформаторов тока и напряжения трансформаторной подстанции предприятия (рис. 3), причем для правильной работы регулятора необходимо брать линейное напряжение двух фаз и ток третьей фазы, например, напряжение U_{AC} и ток I_B . Такое включение регулятора является стандартным и способствует снижению влияния возможной несимметрии сети на точность работы регулятора.

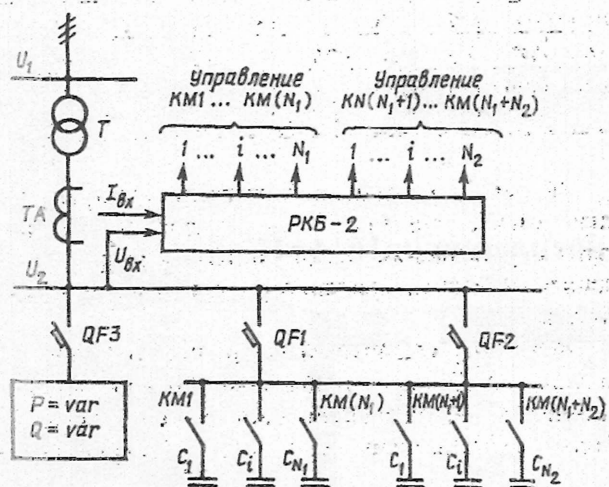


Рис. 3

Для получения одинаковой зоны нечувствительности при различных токах узла нагрузки необходимо, чтобы частота преобразователя ток-частота изменялась по закону

$$f_{\text{зап}} = \omega_0 K_{\text{сч}} / \arcsin \left[\frac{\Delta Q_{\text{неч}}}{\sqrt{3} K_V K_A U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}} \right],$$

где $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$ — круговая частота; $K_{\text{сч}}$ — коэффициент деления счетчиков блока зоны нечувствительности; $\Delta Q_{\text{неч}}$ — реактивная мощность,

соответствующая зоне нечувствительности регулятора; K_V и K_A — коэффициент трансформации трансформаторов напряжения и тока ТП; $U_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вх}}$ — входные напряжение и ток регулятора.

Как показывают расчеты, проведенные для наиболее часто применяемых в цеховых ТП силовых трансформаторов и косинусных конденсаторов, угол сдвига по фазе между напряжением и током узла нагрузки при регулируемой КБ не превышает нескольких градусов, поэтому с погрешностью не более 1% можно синус угла заменить самим углом, и тогда последнее выражение примет вид

$$f_{\text{зап}} = \frac{\sqrt{3} \omega_0 K_{\text{сч}} K_V K_A U_{\text{вх}}}{\Delta Q_{\text{неч}}} I_{\text{вх}} = A I_{\text{вх}},$$

т.е. эта частота должна изменяться прямопропорционально входному току и при малых зонах нечувствительности $\Delta Q_{\text{неч}}$ достигать больших значений, порядка нескольких сотен килогерц.

Для изменения зоны нечувствительности при работе регулятора с КБ разной мощности преобразователь ток-частота должен быть перестраиваемым, причем при перенастройке коэффициента преобразования линейность не должна ухудшаться больше, чем на 1%.

Известные простые схемы преобразователей ток-частота (или напряжение-частота) обеспечивают линейность только для выходных частот не более нескольких десятков килогерц. Поэтому для сохранения стабильности зоны нечувствительности регулятора при управлении КБ как со ступенями большой, так и малой мощности в его схему введен блок удвоения частоты 5, который позволяет поднять до необходимой величины верхний предел частоты заполняющего сигнала при сохранении линейности преобразования ток-частота.

Блоки 10 и 11 выполнены на базе счетчиков с неравными коэффициентами пересчета $K_{\text{сч}}^{(10)} \neq K_{\text{сч}}^{(11)}$, за счет чего они формируют неравные зоны нечувствительности при потреблении и генерировании реактивной мощности $\Delta Q_{\text{неч}}^{(L)} \neq \Delta Q_{\text{неч}}^{(C)}$ (рис. 4).

Устанавливая съемными перемычками в блоках 10 и 11 разные или равные коэффициенты пересчета $K_{\text{сч}}^{(10)}$ и $K_{\text{сч}}^{(11)}$ можно получить необходимые соотношения зон нечувствительности при потреблении и генерировании реактивной мощности

$$\Delta Q_{\text{неч}}^{(L)} < \Delta Q_{\text{неч}}^{(C)}; \Delta Q_{\text{неч}}^{(L)} > \Delta Q_{\text{неч}}^{(C)};$$

$$\Delta Q_{\text{неч}}^{(L)} = \Delta Q_{\text{неч}}^{(C)}.$$

Для оперативного пропорционального изменения зон нечувствительности преобразователь

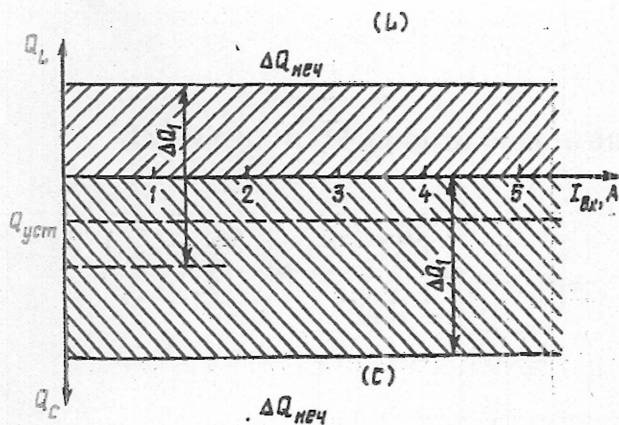


Рис. 4

ток-частота 4 выполнен перестраиваемым с изменением коэффициента преобразования резистором, вынесенным на лицевую панель регулятора.

Выдержку времени Δt можно изменять перестановкой перемычек в счетчиках блока 13.

Такими схемными решениями регулятора достигается его универсальность, т.е. использование одного и того же регулятора без особых переналадок в различных условиях эксплуатации при широком диапазоне нагрузок с КБ низкого или (и) высокого напряжения, при стабильной зоне нечувствительности, имеющей в случае необходимости различную величину при потреблении или генерировании реактивной мощности.

Модификации разработанного регулятора прошли опытно-промышленные испытания на нескольких промышленных предприятиях и показали надежность в работе при наличии ожидаемых технико-экономических характеристик.

Надійшла 12.10.95