

Энергосберегающие выпрямители с улучшенной электромагнитной совместимостью

Зайцев А.И., Ладанов А.И.

В работе дается оценка энергетических показателей энергосберегающих компенсированных выпрямителей и электромагнитной совместимости их с питающей сетью.

Свойство полууправляемости делает возможным включение тиристорov лишь в области так называемых отстающих углов управления (вправо от точки естественной коммутации). Это свойство однооперационных тиристорov приводит к потреблению реактивной мощности индуктивного характера. В наиболее распространенных схемах управляемых вентильных преобразователей (УВП) потребление реактивной мощности происходит в размерах, пропорциональных степени регулирования выходного напряжения. В результате работа мощного вентильного преобразователя зачастую сопровождается посадками напряжения в питающей сети, нарушающими режим энергоснабжения предприятий. Компенсация реактивной мощности, потребляемой УВП, затруднительна и часто малоэффективна, ввиду сравнительно высокого быстродействия этих устройств.

В этой связи большие возможности для улучшения динамических и энергетических показателей УВП представляет метод искусственной коммутации тиристорov. Управление преобразователями с искусственной коммутацией возможно в области опережающих углов ($-\pi \leq \alpha \leq 0$), что превращает эти устройства из потребителей в генераторы реактивной мощности емкостного характера (компенсационные преобразователи). Существует возможность построения преобразователей, работа которых основывается на сочетании искусственной и естественной коммутации вентилей. Регулирование этих устройств возможно с поддержанием $\cos\varphi_{(1)} = 1$, в связи с чем их принято называть компенсированными.

Последний этап в развитии УВП с искусственной коммутацией ознаменовался появлением глубокорегулируемых устройств, свойства которых делают возможным применение их в широкой области техники.

Принципы построения и управления УВП с искусственной коммутацией могут быть перенесены на область преобразовательных схем, выполняемых на полностью управляемых приборах, которые в настоящее время бурными темпами внедряются в область силовой преобразовательной техники.

Особенности построения вентильных преобразователей переменного тока в постоянный на базе полностью управляемых приборов и устройств

Выбор элементной базы преобразователей рассматриваемого класса осуществляется с учетом преобразуемой мощности. Силовые цепи управляемых тиристорных преобразователей с искусственной коммутацией должны содержать, как правило, три функциональные части: тиристорный выпрямитель, устройство искусственной коммутации (УИК) и устройство защиты от коммутационных перенапряжений (УЗП). УИК служит для прерывания протекающего через тиристоры тока, в результате чего достигается эффект двух операционного управления преобразователем. Усовершенствование конденсаторной коммутации происходит в направлении отделения цепей коммутации от нагрузки, обеспечивающей инвариантность процессов прерывания тока вентилей от параметров и процессов в цепи выпрямленного тока.

Одновременно существует тенденция к уменьшению необходимой емкости коммутирующих конденсаторов путем создания таких УИК, в которых она определяется лишь временем восстановления запирающих свойств тиристорov. Все это способствует

улучшению регулировочных свойств преобразователей, а также делает их внешние характеристики более жесткими и линейными с высокой добротностью и собственной частотой порядка нескольких кГц. Такие УИК обеспечивают надежное и практически мгновенное выключение силовых вентилях в любой части диапазона регулирования при любой допустимой величине протекающего тока.

В схемах с управляемыми вентилями применение конденсаторов может обеспечить плавный принудительный перевод тока нагрузки во время коммутации из фазы с большим напряжением в фазу с меньшим напряжением сети. Это облегчает условия работы вентильных ключей в схемах выпрямления.

Стремление уменьшить емкость коммутирующих конденсаторов в тиристорных преобразователях влечет за собой необходимость разработки эффективных устройств защиты от коммутационных перенапряжений. Такие УЗП становятся обязательной частью не только тиристорных, но и более мощных транзисторных схем, что обуславливает актуальность указанной проблемы.

Назначением УЗП является вывод из контура коммутации фазных токов избытка электромагнитной энергии, выделяющейся на индуктивных элементах в момент запаривания вентилях. Необходимо отметить, что до сих пор наибольшее применение находят УЗП, работающие по принципу рассеивания энергии, заимствованному из практики преобразователей с естественной коммутацией вентилях.

Однако, ввиду несоизмеримости энергий, выделяющихся в условиях естественной и искусственной коммутаций, в последнем случае КПД преобразователя резко уменьшается. Применяв схемные решения, появилась возможность обеспечения двустороннего обмена энергией фильтра с контуром коммутации. Данный принцип положен в основу работы компенсированных преобразователей.

Работа конденсаторного фильтра в режимах двустороннего обмена энергией с индуктивными элементами контура коммутации

Рассмотрим работу конденсаторного фильтра в режимах, когда его заряд под воздействием тока выходящей из работы фазы чередуется с частичным разрядом тока включаемой фазы.

Однако для его использования важно выяснить возможность установившейся работы устройства, которая, очевидно, может быть лишь в условиях равенства энергий, отдаваемых и получаемых конденсатором на интервалах повторяемости процессов.

Реализация указанного принципа возможна при различной задаваемой частоте следования разряда и заряда конденсатора в схеме, изображенной на рис. 1, а, б.

Данный преобразователь содержит группу силовых полностью управляемых вентилях (типов GTO, IGCT или IGBT) VT_1 , VT_2 , VT_3 , группу вспомогательных маломощных диодов VD_1 , VD_2 , VD_3 , полярный конденсатор фильтра $C\phi$, коммутирующий вентиль VT_k и разделительный диод VD_4 . Схема содержит минимально возможное число вспомогательных элементов, необходимых для реализации рассматриваемых режимов. Для того чтобы конденсатор начал разряжаться током вступающей в работу фазы, необходимо подать управляющий импульс на включение силового вентиля этой фазы и одновременно на вентиль VT_k (рис. 1, а).

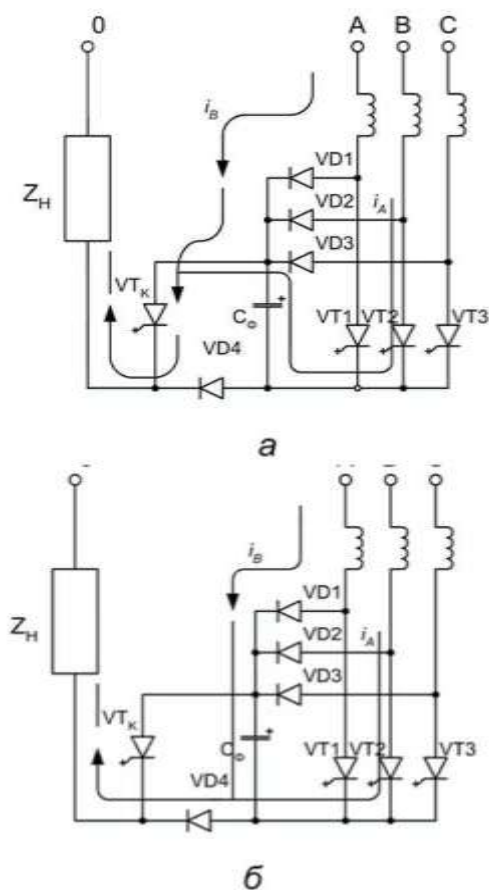


Рис. 1. Схема преобразователя с конденсаторным фильтром на первом (а) и втором (б) этапах коммутации

Перевод конденсатора в цепь выходящей из работы фазы с целью его заряда осуществляется путем выключения силового вентиля в этой фазе и одновременно вентиля VT_k (рис. 1, б).

На внекоммутационных интервалах конденсатор оказывается вне контура тока нагрузки, не оказывая влияния на протекание процессов в схеме.

Установившиеся режимы и энергетические характеристики компенсированного преобразователя с конденсаторным фильтром

Оснащение компенсированного преобразователя конденсаторным фильтром придает ему ряд новых свойств. Принципиальная схема рассматриваемого устройства приведена на рис. 2.

При допущении мгновенности коммутаций можно получить простые зависимости и сделать общие выводы относительно гармонического состава тока, потребляемого из сети компенсированным преобразователем. При разложении периодических несинусоидальных функций ряд Фурье определяются действующие значения ряда нечетных гармоник тока ($n=1,5,7,\dots$).

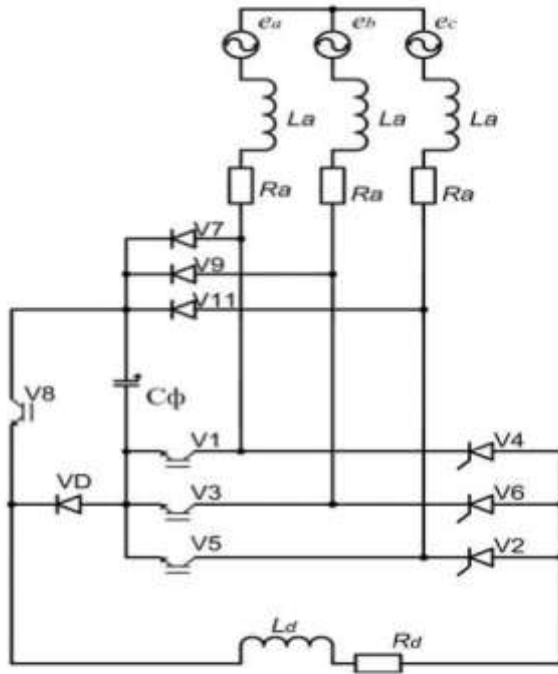


Рис. 2. Принципиальная схема компенсированного преобразователя

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi n} I_d \sin \frac{\pi n}{3} \cdot \cos n\alpha, \quad (1)$$

для действующих значений ряда четных гармоник ($n=2,4,6,\dots$)

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi n} I_d \sin \frac{\pi n}{3} \sin n\alpha, \quad (2)$$

откуда следует, что в составе переменного тока преобразователя отсутствуют гармоники кратные трем, однако присутствуют четные составляющие.

На основании полученных выражений на рис.3 построены зависимости действующих значений некоторых основных гармоник в функции угла регулирования.

Величины гармоник отнесены к амплитуде первой гармоники при $\alpha = 0$. Из этого графика видно, что первая гармоника тока с увеличением угла регулирования монотонно уменьшается по закону косинусоидальной функции.

Действующее значение высших гармоник периодически изменяет свою величину, причем максимальные значения их обратно пропорциональны своему порядковому номеру:

$$I_{n \max}^* = \frac{1}{n}. \quad (3)$$

Фазовый сдвиг первой гармоники тока относительно кривой напряжения (считаем ее синусоидальной):

$$\varphi_1 = \arctg \frac{a_1}{b_1} - \frac{\pi}{6} = \arctg \frac{1}{2 \sin \frac{\pi}{3}} - \frac{\pi}{6} = 0, \quad (4)$$

где a_1, b_1 - коэффициенты при нулевом члене ряда Фурье.

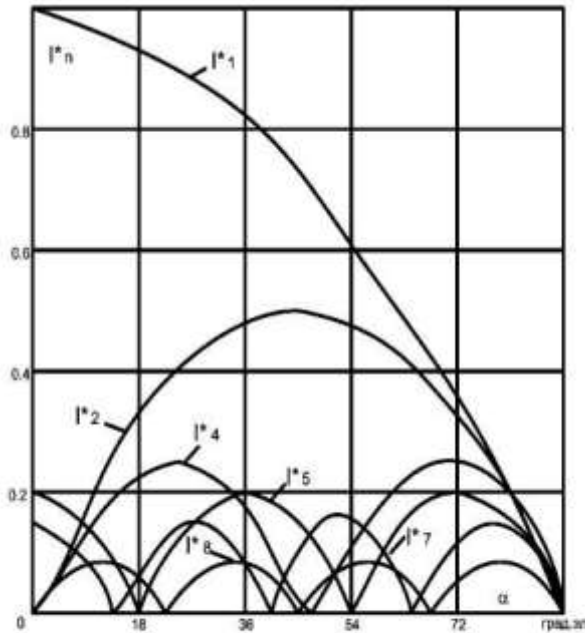


Рис. 3. Действующие значения гармоник фазного тока в функции угла управления

Выражение (4) показывает, что коэффициент сдвига ($\cos\varphi_1$) по первой гармонике компенсированного преобразователя не зависит от углов управления и при допущении мгновенной коммутации равен единице. Следовательно, работа компенсированного преобразователя происходит без перетоков реактивной мощности между установкой и питающей сетью.

Таким образом, полная мощность компенсированного преобразователя содержит лишь две составляющие и определяется по выражению

$$S = \sqrt{P^2 + T^2}, \quad (5)$$

где $S = m \cdot u \cdot I$ - полная мощность;

$P = m \cdot u \cdot I_1$ - активная мощность;

$T = m \cdot u \cdot \sum_{n=2}^{\infty} I_n$ - мощность искажения.

Приняв в качестве базовой величины полную мощность S при $\alpha = 0$, получаем зависимость в относительных единицах:

- в диапазоне регулирования $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$:

$$S_*(\alpha) = 1; \quad P_*(\alpha) = \frac{3}{\pi} \cos \alpha; \quad (6)$$

$$T_*(\alpha) = \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} \cos^2 \alpha};$$

- в диапазоне регулирования $\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$:

$$S_*(\alpha) = \sqrt{\frac{3(\pi - 2\alpha)}{2\pi}}; \quad P_*(\alpha) = \frac{3}{\pi} \cos \alpha; \quad (7)$$

$$T_*(\alpha) = \sqrt{\frac{3\pi^2 - 6\alpha\pi - 18\cos^2 \alpha}{2\pi^2}}.$$

Данные зависимости позволяют оценить содержание высших гармоник в фазном токе преобразователя. Из графиков рис. 4, построенных на основании (6) (7), следует, что, в отличие от обычных схем выпрямления, уменьшение выходного напряжения при

регулировании компенсированного преобразователя сопровождается уменьшением величины полной, а также полезной мощностей.

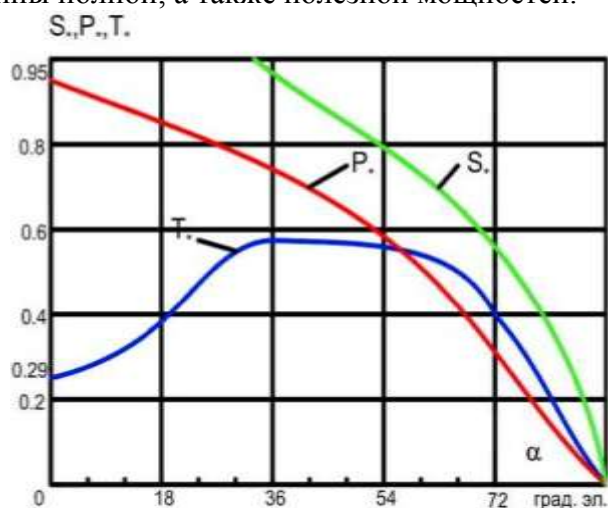


Рис. 4. Полная мощность компенсированного преобразователя и её составляющие в функции угла управления

В отличие от преобразователей с естественной коммутацией характер изменения мощности искажения не монотонный. В результате присутствия в гармоническом составе фазного тока четных гармоник содержание высших гармоник наиболее велико в средней

части диапазона регулирования $\left(\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}\right)$.

Коэффициент искажения фазного тока компенсированного преобразователя $K_u = \frac{I_1}{I}$, (8)

где I_1 - действующее значение основной гармоники.

При $\cos \varphi_1 = 1$ во всем диапазоне, коэффициент мощности K_M устройства будет равен коэффициенту искажения K_H и определяется

- в диапазоне регулирования $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$:

$$K_M = K_H = \frac{3}{\pi} \cos \alpha; \quad (9)$$

- в диапазоне регулирования $\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$:

$$K_M = K_H = \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{\pi(\pi - 2\alpha)}} \cos \alpha. \quad (10)$$

График зависимости коэффициента искажения в функции угла регулирования построенный по выражениям (9) и (10), представлен на рис. 5.

Известно, что наличие высших гармонических составляющих в составе переменного тока, в мощных вентильных преобразователях неблагоприятно влияют на показатели качества электроэнергии. Степень этого влияния в первую очередь зависит от абсолютных величин гармоник тока вентильных преобразователей. Показатель влияния преобразователя на питающую сеть принято определять через величину коэффициента искажения, так как в обычных схемах выпрямления он характеризует абсолютные величины высших гармоник тока.

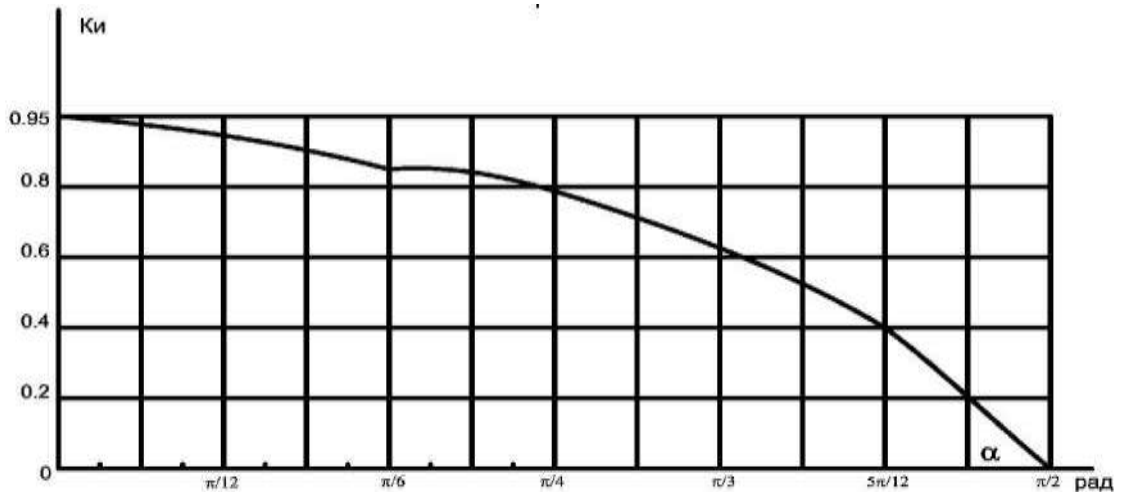


Рис. 5. Изменение коэффициента искажения в функции угла управления

В компенсированном преобразователе величина коэффициента искажения характеризует лишь относительное содержание высших гармоник, так как величина полного потребляемого тока здесь является также функцией угла управления. Это позволяет считать, что несмотря на падающий характер зависимости $K_{II} = f(\alpha)$ (рис. 4), работа компенсированного преобразователя в зарегулированном состоянии не будет вести к ухудшению качества энергии, так как потребление тока с увеличением угла управления α снижается.

Применение компенсированных преобразователей позволяет:

- улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью до уровня неуправляемых выпрямителей.
- снизить активные потери энергии в питающей линии, так как питающая сеть разгружается от перетекающей реактивной мощности.
- уменьшить колебания напряжений в сети при переходных процессах в электроприводе (пуск, сброс и наброс нагрузки).
- исключить необходимость в установке косинусных конденсаторов для повышения коэффициента мощности.

Журнал «Электротехнические комплексы и системы управления», www.v-itec.ru/electrotech