

6.1. Принцип инвертирования

Зависимый инвертор служит для передачи потока мощности от источника постоянного напряжения в сеть переменного напряжения, т.е. инвертирование — это процесс, обратный выпрямлению.

При выпрямлении сеть переменного напряжения служит источником электрической энергии, а цепь постоянного напряжения — ее потребителем, тогда как при инвертировании изменяется направление потока мощности: цепь постоянного напряжения становится источником, а сеть переменного напряжения — ее потребителем.

Рассмотрим формальные признаки источника и потребителя электрической энергии. На рис. 6.1, а приведена электрическая цепь, состоящая из двух источников постоянного напряжения (например, аккумуляторных батарей) и резистора сопротивлением R , ограничивающего ток в контуре. На схеме стрелками показаны направления токов и ЭДС при $E_1 > E_2$. В этом случае батарея E_1 будет отдавать электрическую энергию, разряжаясь, а батарея E_2 будет принимать энергию, заряжаясь. Часть энергии уйдет на нагрев резистора, который также является потребителем энергии. Так как вектор ЭДС

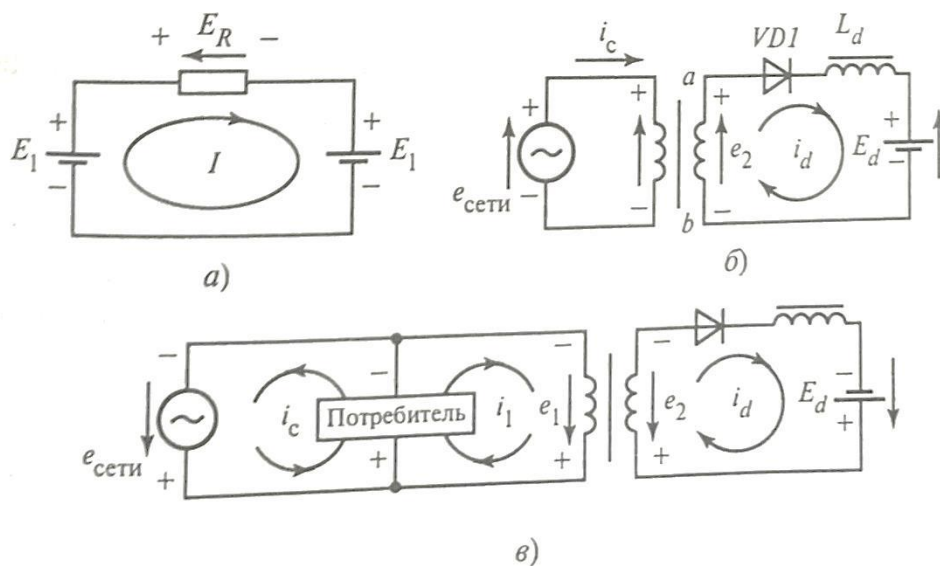


Рис. 6.1

направлен от минуса к плюсу, то на сопротивлении также обозначено направление квазиЭДС.

По взаимному направлению токов и ЭДС можно судить о том, какой из элементов электрической цепи является источником электрической энергии, а какой ее потребителем. Так, на схеме видно, что если направления тока и ЭДС совпадают, то такой элемент является источником электрической энергии. В противном случае он служит потребителем. На рис. 6.1, б показана схема однополупериодного выпрямителя, который заряжает аккумуляторную батарею. На элементах схемы поставлены знаки ЭДС, соответствующие моменту времени, когда диод может пропускать ток. По направлению токов и ЭДС можно судить, что сеть (e_c) служит источником энергии, а первичная обмотка трансформатора — ее потребителем. Вторичная обмотка трансформатора также служит источником (e_2) по отношению к заряжающейся батарее (E_d).

Для того чтобы аккумуляторная батарея стала источником энергии, необходимо обеспечить, чтобы направление тока вентиля совпадало с направлением ЭДС E_d (как это показано на рис. 6.1, в).

Чтобы вторичная обмотка трансформатора играла роль приемника энергии от источника постоянного напряжения, необходимо включать вентиль в те интервалы времени, когда направления тока и ЭДС на вторичной обмотке трансформатора противоположны. Значит, вентили должны быть управляемыми, обычно это тиристоры. Как видно на схеме, ток должен проходить при отрицательном потенциале анода. Значение отрицательного потенциала катода больше, чем анода, поэтому условия для открытия тиристора в инверторном режиме не нарушаются. На схеме рис. 6.1, в хорошо видно, что первичная обмотка трансформатора на интервале проводимости вентиля играет роль источника энергии для потребителей в цепи переменного напряжения.

Из изложенного выше следует, что зависимым инвертором может быть схема любого управляемого выпрямителя. Режим инвертирования задает система управления вентильного преобразователя, обеспечивающая включение вентилей на временных интервалах, когда токи и ЭДС вторичных обмоток трансформатора имеют встречное направление. Рассмотренный инвертор называют зависимым или ведомым сетью, если для его работы имеется сеть переменного напряжения и частота переключения вентилей определяется частотой сетевого напряжения.

5.3. Инверторы, ведомые сетью

5.3.1. Принцип действия инвертора, ведомого сетью

Инвертирование — это преобразование электроэнергии постоянного тока в энергию переменного тока. Термин «инвертор» происходит от латинского слова «*inversio*» — переворачивание, перестановка. В силовой электронике этот термин был введен для обозначения процесса, обратного выпрямлению. При инвертировании поток энергии изменяет свое направление на обратное и поступает от источника постоянного тока в сеть переменного тока. Преобразователь, работающий в этом режиме, называется *инвертором*, ведомым сетью, так как коммутация его вентилях осуществляется под действием переменного напряжения внешней сети [1]. Поскольку электрические параметры преобразователя в этом случае полностью определяются параметрами внешней сети переменного тока, его иногда называют *зависимым инвертором*.

Принцип действия инвертора, ведомого сетью, рассмотрим на примере простейшей схемы, представленной на рис. 5.30, а. Допустим, что элементы схемы идеальные, а внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи AB равно нулю. Наличие источников переменного и постоянного тока и управляемого тиристора позволяет организовать реверсирование потока электроэнергии, т.е. однофазный

преобразователь на тиристоре может работать как в выпрямительном, так и в инверторном режиме. В результате однополупериодный ток протекает как от сети в аккумуляторную батарею, так и в обратную сторону — от аккумуляторной батареи в сеть переменного тока.

На рис. 5.30, б приведены диаграммы напряжения и тока, иллюстрирующие работу схемы в выпрямительном режиме. При допущении равенства нулю внутренних сопротивлений источников переменного и постоянного тока можно считать, что их напряжения равны ЭДС, т.е. $e_{ab} = u_{ab}$ и $E_{AB} = U_{AB}$. Если вывод «плюс» батареи соединен так, как показано на рис. 5.30, а пунктиром, то схема может работать в режиме выпрямления с нагрузкой в виде противоЭДС, что соответствует режиму заряда AB . При изменении полярности AB возможна работа схемы в режиме инвертирования. Рассмотрим эти процессы более подробно.

При подаче на тиристор импульса управления в момент времени $\vartheta = \vartheta_1$, определяемый углом управления α , тиристор включается. В результате этого из сети в батарею AB поступает ток i_d . Благодаря сглаживающему реактору L_d ток i_d будет плавно изменяться во времени: увеличиваться, пока $u_{ab} > U_d$, и уменьшаться при $U_d > u_{ab}$. В момент времени ϑ_3 , соответствующий равенству заштрихованных площадей на рис. 5.30, б, ток i_d становится равным нулю, а тиристор VS выключается. Протекание через тиристор тока i_d на интервале от ϑ_2 до ϑ_3 , когда $U_d > u_{ab}$, обусловлено накоплением электромагнитной энергии в реакторе L_d . Далее рассмотренные процессы периодически повторяются, в результате чего батарея AB будет заряжаться выпрямленным током (ток i_d направлен навстречу ЭДС E_{AB}).

Для перевода схемы в инверторный режим необходимо переключить полярность батареи.

Передача энергии от одного источника к другому происходит тогда, когда ток от отдающего источника направлен навстречу ЭДС источника, принимающего эту энергию. В рассматриваемом случае передача энергии в сеть от аккумуляторной

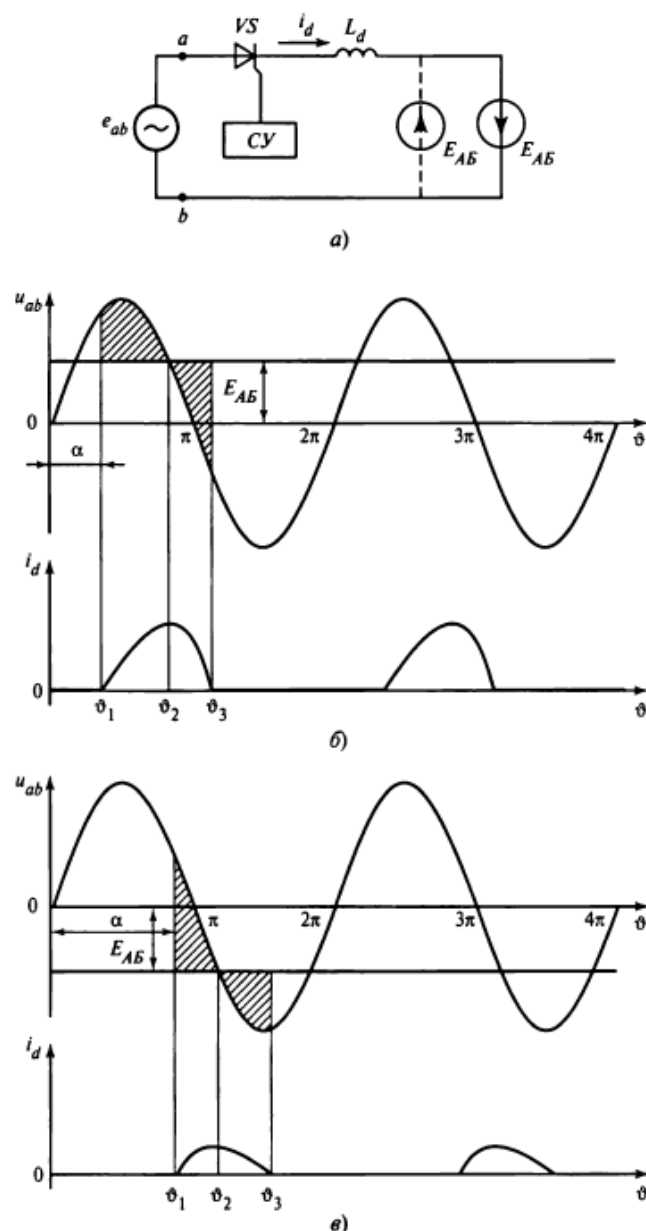


Рис. 5.30. Однополупериодный обратимый преобразователь:

a — схема; b — диаграммы напряжения и тока в выпрямительном режиме; c — диаграммы напряжения и тока в инверторном режиме

батареи будет происходить, когда ЭДС сети e_{ab} направлена навстречу току i_d . На рис. 5.30, c приведены диаграммы напряжения и тока в элементах схемы для инверторного режима. Если в момент времени ϑ_1 на тиристор VS подать импульс управления, то тиристор включится, так как к нему приложено положительное прямое напряжение. Прямое напряжение на тиристоре существует вплоть до момента времени ϑ_2 . Начиная с этого момента напряжение u_{ab} по абсолютному значению больше ЭДС E_{AB} . Под воздействием разности напряжений $U_{AB} - u_{ab}$ в цепи протекает ток i_d , противоположный по знаку напряжению сети u_{ab} . Наличие в схеме сглаживающего реактора L_d ограничивает скорость нарастания этого тока и его максимальное значение. За счет энергии, накапливаемой в реакторе, ток продолжает протекать в тиристоре после того, как напряжение u_{ab} по абсолютному значению будет больше напряжения U_d и станет равным нулю в момент времени ϑ_3 , соответствующий равенству заштрихованных областей на рис. 5.30, c .

Схемы зависимых инверторов по существу не отличаются от схем управляемых выпрямителей. Поэтому они могут рассматриваться как схемы реверсивных преобразователей, способных передавать электрическую энергию из сети в источник постоянного тока (выпрямительный режим) и наоборот (инверторный режим). Такие преобразователи являются преобразователями переменного (постоянного) тока, преобразующими переменный ток в постоянный и (или) наоборот [1]. Схема однополупериодного инвертора из-за плохих технико-экономических показателей редко применяется.

4.1.3. Трехфазные схемы зависимых инверторов

Особенности работы этих схем рассмотрим на примере трехфазного нулевого зависимого инвертора (рис. 4.6), при условии $X_d = \infty$, $X_a \neq 0$.

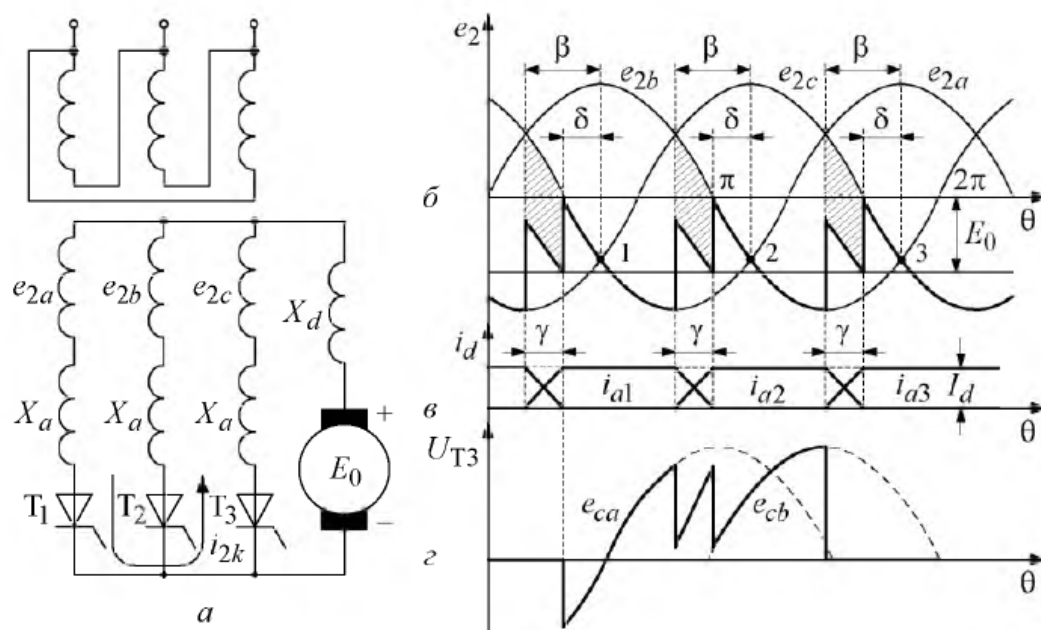


Рис. 4.6. Трехфазный нулевой зависимый инвертор

В отличие от предыдущей схемы зависимого инвертора здесь отсчет углов опережения β осуществляется от точек пересечения фазных ЭДС. Поскольку ток от источника питания E_0 должен протекать по обмоткам трансформатора, преодолевая фазные ЭДС, то на рис. 4.6, б рабочими являются участки ЭДС e_{2a} ; e_{2b} ; e_{2c} , расположенные ниже оси абсцисс. Пусть в точке $\theta = 0$ проводит ток вентиль T_3 , преодолевая противоЭДС e_{2c} . В точке $\theta = \frac{2\pi}{3}$ ЭДС e_{2c} изменит полярность на противоположную и из противоЭДС превратится в согласно включенную ЭДС, что при открытом вентиле T_3 приведет к «опрокидыванию» инвертора. Чтобы не допустить этого, нужно раньше этого момента выключить вентиль T_3 . Для этого в точке $(\alpha - \beta)$ (рис. 4.6, б) система управления открывает вентиль T_1 , ток переходит на фазу a , так как

противоЭДС e_{2c} , действующая в этой цепи, меньше, чем e_{2c} в цепи вентиля T_3 . Вентиль T_1 , открываясь, подключает потенциал фазы a к катоду вентиля T_3 , а анод T_3 имеет потенциал фазы c . В результате T_3 оказывается под запирающим напряжением $e_{2c} - e_{2a}$, но закрыться мгновенно он не может из-за ЭДС самоиндукции $\left(X_a \frac{di_{a3}}{d\theta}\right)$, которая поддерживает прежнее направление тока i_{a3} , пока не израсходуется энергия, запасенная в магнитном поле индуктивного сопротивления X_a . Поэтому в течение интервала γ будут одновременно открыты оба вентиля T_1 и T_3 , что приводит к появлению коммутационного контура между фазами a и c . Электромагнитные процессы в этом контуре описываются уравнением

$$e_{2a} - X_a \frac{di_{ak}}{d\theta} - X_a \frac{di_{ak}}{d\theta} - e_{2c} = 0. \quad (4.9)$$

Переносим начало координат в точку 1, получаем:

$$e_{2a} - e_{2c} = -2\sqrt{2}E_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \theta. \quad (4.10)$$

Решая уравнение (4.9) относительно i_{2k} и учитывая начальные условия, получаем:

$$\begin{aligned} i_{2k} \Big|_{\theta = -\beta} &= 0, \\ i_{2k} &= \frac{\sqrt{2}E_2 \sin \frac{\pi}{3}}{X_a} (\cos \theta - \cos \beta). \end{aligned} \quad (4.11)$$

На участке коммутации этот ток представляет собой ток вентиля T_1 , вступающего в работу: $i_{2k} = i_{a1}$, ток $i_{a3} = I_d - i_{a1}$.

Процесс коммутации заканчивается, когда $i_{a1} \Big|_{\theta = -\beta + \lambda} = I_d$.

Из этого условия находим γ :

$$\gamma = \beta - \arccos \left(\frac{I_d X_a}{\sqrt{2}E_2 \sin \frac{\pi}{m}} + \cos \beta \right). \quad (4.12)$$

Далее процессы повторяются во всех точках переключения вентилях. На рис. 4.6, z изображено напряжение на вентиле T_3 .

Среднее значение противоЭДС инвертора

$$E_{\alpha\beta} = E_{\alpha\beta_0} + \Delta U_x, \quad (4.13)$$

где $E_{d\beta_0}$ – противоЭДС при отсутствии коммутационных процессов (на холостом ходу):

$$\begin{aligned} E_{d\beta_0} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{7}{6}\pi-\beta} \sqrt{2}E_2 \sin\theta d\theta = \\ &= -\frac{\sqrt{2}E_2}{\frac{2\pi}{3}} \sin \frac{\pi}{m} \cos\beta = -1,17E_2 \cos\beta. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Среднее значение прироста противоЭДС инвертора ΔU_x за счет коммутационных процессов и определяемое величиной заштрихованной площадки рис. 4.6, б равно

$$\Delta U_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\beta}^{-\beta+\gamma} \left(\frac{e_{2c} + e_{2a}}{2} - e_{2a} \right) d\theta = -\frac{I_d X_a}{\frac{2\pi}{3}}. \quad (4.15)$$

Таким образом,

$$E_{d\beta} = -1,17 \cos\beta - \frac{I_d X_a}{\frac{2\pi}{3}}, \quad (4.16)$$

представляет собой уравнение входной характеристики инвертора (рис. 4.7). Так как минимальное значение угла запаса δ ограничено временем выключения тиристора ($\delta_{\min} = \omega t_{\text{выкл}}$), то угол γ не должен превышать критического значения $\gamma_{\text{кр}} = \beta - \delta_{\min}$.

Следовательно, критическое значение тока $I_{d\text{кр}}$, соответствующее $\gamma_{\text{кр}}$, находится из (4.12):

$$I_{d\text{кр}} = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a} \sin \frac{\pi}{3} (\cos \delta_{\min} - \cos \beta); \quad (4.17)$$

$$U_{d\beta\text{кр}} = -1,17E_2 \left(\frac{\cos \delta_{\min} + \cos \beta}{2} \right). \quad (4.18)$$

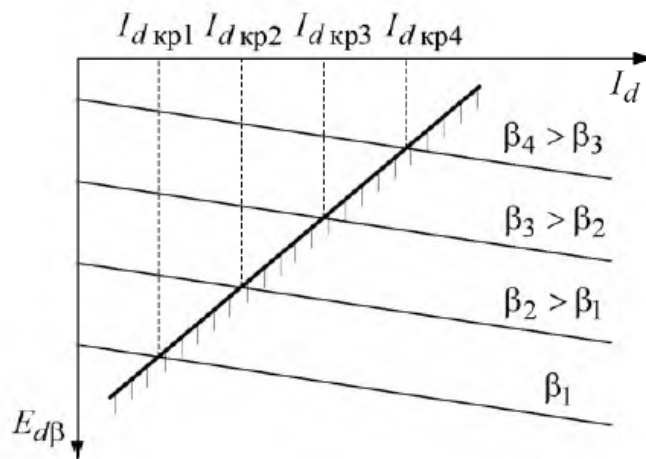


Рис. 4.7. Ограничительная характеристика трехфазного нулевого зависимого инвертора

По полученным выражениям строится ограничительная характеристика инвертора (рис. 4.7).

Совершенно аналогично протекают коммутационные процессы в трехфазной мостовой схеме зависимого инвертора, но в расчетных соотношениях 4.12, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 следует учитывать, что пульсность мостовой схемы в отличие от нулевой схемы $m = 6$, а коэффициент схемы равен 2,34.