

ГЛАВА 2

ИНВЕРТОРЫ, ВЕДОМЫЕ СЕТЬЮ

§ 2.1. Общие сведения

Инвертор – это устройство, предназначенное для преобразования постоянного тока в переменный. В преобразовательных устройствах режим инвертирования очень часто чередуется с режимом выпрямителя, т.е. одна и та же преобразовательная установка может быть и выпрямителем и инвертором (например, в электроприводах постоянного тока). В двигательном режиме электропривода преобразовательная установка выполняет функции выпрямителя, передавая мощность двигателю постоянного тока. При переходе машины в режим генератора (движение под уклон, спуск груза, торможение и т.д.) преобразователь работает в режиме инвертирования, отдавая мощность, генерируемую машиной постоянного тока, в сеть переменного тока. Таким образом, при инвертировании источник постоянного напряжения работает как генератор электрической энергии, у которого направления э. д. с. и тока совпадают, а нагрузка (сеть переменного тока) – как потребитель, у которого направления э. д. с. и тока встречны, т.е. напряжение на вторичной обмотке трансформатора и анодный ток тиристоров имеют разное направление.

Различают два типа инверторов: инверторы, ведомые сетью (зависимые), отдающие энергию в сеть переменного тока, и автономные (независимые инверторы), у которых потребителем является нагрузка переменного тока, не имеющая других источников переменного напряжения.

В инверторах, ведомых сетью, ток с одного тиристора на другой коммутируется напряжением сети переменного тока, а частота инвертированного тока на выходе равна частоте сети.

В автономных инверторах ток тиристоров коммутируется специальным коммутирующим устройством, а частота инвертируемого тока определяется частотой управляющих импульсов. Автономные инверторы подробно рассмотрены в главе 4.

§ 2.2. Простейший однофазный инвертор

Схема простейшего однофазного инвертора (рис. 2.1) аналогична рассмотренной в гл. 1 схеме однополупериодного выпрямителя, работающего на нагрузку в виде двигателя постоянного тока. Инвертор содержит генератор постоянного напряжения с э. д. с. E_d , тиристор B ,

дроссель L_d и выходной трансформатора T_p . Первичная обмотка трансформатора ω_1 подключена к сети переменного тока с генератором переменного тока e_c . Во вторичной обмотке ω_2 создается переменное напряжение, которое можно представить без учета потерь в инверторе в виде источника переменной э. д. с. e_2 . (как рис 2.1.а показан инвертор)

В течение первого полупериода (рис. 2.1, б) э. д. с. e_2 и E_d совпадают по направлению, поэтому, учитывая наличие тиристора в цепи, оба источника э. д. с. могут работать только как генераторы электрической энергии; при этом потребителем энергии будет дроссель L_d . На этом интервале режим инвертирования осуществить невозможно. В течение второго полупериода ($\pi - 2\pi$) э. д. с. e_2 (сети переменного тока). При этом э. д. с. E_d будет совпадать по направлению с током i в цепи, а направление э. д. с. e_2 - встречным току.

Для осуществления режима инвертирования необходимо, чтобы тиристор в течение большей части первого полупериода, когда э. д. с. e_2 и E_d совпадают по направлению, был надежно заперт и отпирался только в любой момент интервала времени $\vartheta_0 - \vartheta_\Gamma$ (рис. 2.1, б). При этом величина э. д. с. E_d должна быть меньше амплитуды э. д. с. E_{2m} . Граничная точка ϑ_0 здесь определяется тем, что только до точки O_1 между анодом и катодом тиристора напряжение положительно и он может быть открыт с помощью сигнала управления. Вторая граничная точка ϑ_Γ определяется необходимостью создания определенного интервала времени, требуемого для восстановления вентильных свойств тиристора после прохождения его тока через нулевое значение до момента появления положительного напряжения между анодом и катодом (до точки O_1'). При выполнении этих условий (при выборе угла управления α в диапазоне $\alpha_0 - \alpha_\Gamma$) ток в режиме инвертирования определяют как результат решения дифференциального уравнения, где $x_d \omega L_d$ - реактивное сопротивление контура инвертирования.

Это будет выражение, аналогичное (1.154).

$$i = \frac{E_d}{\omega L_d} (\vartheta - \alpha) + \frac{E_{2m}}{\omega L_d} (\cos \alpha - \cos \vartheta) \quad (2.2)$$

Поскольку обфудом, в инверторе действующий две идеальные э.д.с.: входная э.д.с. E_d и относительно к которой тиристор включен в инвертирующую цепь, и переменная э.д.с. e_2



a – схема; *б, в* – временные диаграммы токов и напряжений

ма; б, в – временные диаграммы токов и напряжений

На рис. 2.1.5 представлено семейство кривых тока, возникающих при различных углах управления α . Скорость уменьшения тока прямо пропорциональна углу д. с. E_d и e_2 . При $E_d + e_2 > 0$ $\frac{di}{dt} > 0$ и угол д. с. $E_d + e_2 = x_d \frac{di}{d\theta}$ (момент времени θ_0) ток возрастает, при $E_d + e_2 < 0$ ток уменьшается и ток достигает максимума. При $E_d + e_2 < 0$, ток уменьшается и ток достигает максимума. Если включение тиристора произведено до момента времени π (рис. 2.1, б), например при угле управления $\alpha = \alpha_2$, то на интервале $\theta_2 - \pi$ д. с. E_d и e_2 еще совпадают по направлению и оба источника э. д. с. работают как генераторы, электрическая энергия которых преобразуется в энергию магнитного поля дросселя. На интервале $\pi - \theta_2$ источник э. д. с. (сеть переменного тока) работает как потребитель электрической энергии, а в дросселе по-прежнему происходит накопление энергии. С момента времени θ_0 дроссель начинает отдавать энергию в сеть переменного тока. Режим инвертирования наблюдается в течение интервала $\pi - \theta_2$, пока ток i_2 в цепи инвертора не достигнет нулевого значения. С момента времени θ_2 напряжение на тиристоре становится отрицательным, сохраняя отрицательное значение в течение интервала β (рис. 2.1, в).

Правая часть выражения (2.1) определяет мгновенное значение напряжения на дросселе. В дросселе без потерь среднее значение напряжения равно нулю:

$$\int_{\alpha}^{\alpha+\lambda} (E_d + e_2) d\theta = 0. \quad (2.3)$$

Здесь λ — длительность тока через тиристор, которую можно найти из решения уравнения (2.3).

Выражение (2.3) определяет площадь, ограниченную синусоидой e_2 относительно $\sqrt{E_d}$ (рис. 2.1, б) на интервале λ для каждого конкретного значения тока в цепи. Суммарная площадь будет равна нулю (заштрихованные области для токов i_1 и i_2 и незаштрихованная — для токов i_r), если $S_1 = S_1'$ ($S_2 = S_2'$, или $S_r = S_r'$). Пропорциональны площадям будут также энергия, накопленная в магнитном поле дросселе (S_1 , S_2 , S_r), и рассеянная энергия (S_1' , S_2' , S_r').

Прерывание тока в цепи инвертора определяется моментом, когда при заданном угле управления обе площади (S_1 и S_1' , S_2 и S_2' , S_r и S_r') становятся равными между собой. При изменении угла управления в сторону уменьшения площадь S_1 , а следовательно и площадь S_1' будут все время возрастать. Однако увеличение этой площади при указанных значениях э. д.

Здесь λ — длительность тока через тиристор, которую можно найти из решения уравнения (2.3).

с. E_{2m} и E_d ограничено участком синусоиды $\theta_1 - \theta_1'$. Как только будет израсходован весь резерв этой площади, тиристор при $\alpha = \alpha_A$ раз включившись, не может выключиться и с точки O_1' его ток начнет снова возрастать под действием положительного напряжения, равного $E_d + e_2$. При этом инвертор переходит в режим короткого замыкания. Точку O_1' , определяющую границу устойчивости работы инвертора, называют граничной, а угол управления α_r , при котором достигается этот предельный v
режим - граничным.

Потеря устойчивости (опрокидывание) в реальных инверторах наступает раньше точки O_1' , так как для восстановления запирающих свойств тиристора после его выключения необходим некоторый промежуток времени δ (рис. 2.1 б) для рассасывания электрических зарядов в $p-n$ -переходах. Следовательно, в реальном инверторе тиристор должен выключаться раньше на угол δ , чем будет достигнута точка O_1' , причем это опережение должно всегда соответствовать наиболее тяжелому режиму работы тиристора, при котором $\delta = \delta_{\max}$.

Аналогичную картину можно получить, если $\alpha = \text{const}$, а $E_d = \text{var}$.

Рассмотренный инвертор содержит те же элементы, что и управляемый выпрямитель, работающий на против - э. д. с. Однако роль против - э. д. с. в режиме инвертирования выполняет не E_d , а напряжение сети переменного тока. Чтобы перейти от режима выпрямления к режиму инвертирования, необходимо изменить направление E_d и увеличить угол управления за
пределы граничного.

4.1.2. Двухполупериодный зависимый инвертор со средней точкой

В схеме (рис. 4.2) предположим, что, начиная с $\theta = 0$, ток проводит тиристор T_2 . При достаточно большой величине X_d ток на интервале проводимости будет непрерывным (рис. 4.2, в) и будет протекать от источника E_0 , преодолевая противоЭДС e_{2b} вторичной обмотки трансформатора, при этом поток энергии направлен из источника E_0 в питающую сеть. Если тиристор T_1 будет открыт до точки π , то на интервале $\pi \dots 2\pi$ возникает, как было отмечено выше, аварийный режим, и инвертор «опрокидывается». Во избежание этого тиристор T_2 надо обязательно закрыть до точки π . Поэтому в точке $(\pi - \beta)$ система управления открывает тиристор T_1 .

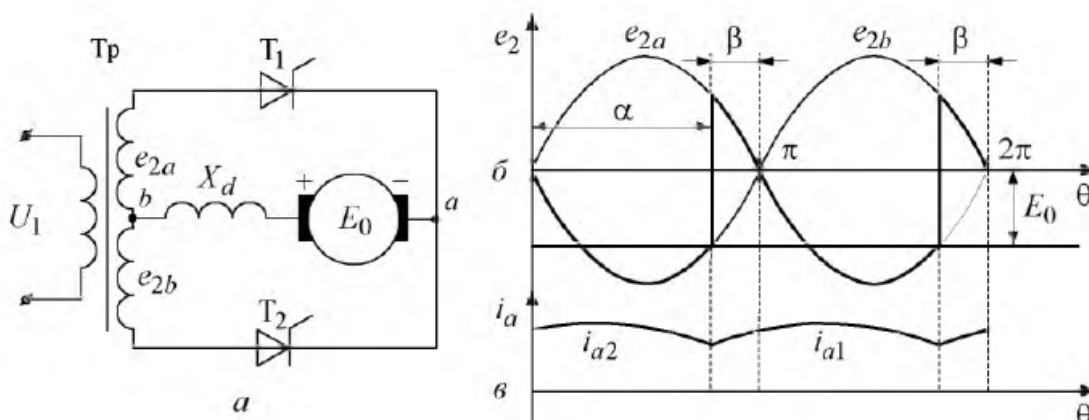


Рис. 4.2. Двухполупериодный зависимый инвертор со средней точкой

В этот момент времени в цепи тиристора T_1 имеет место согласное включение e_{2a} и E_0 , поэтому на интервале $(\pi - \beta) \dots \pi$ ток i_{a1} будет протекать под действием суммы $e_{2a} + E_0$, а в точке π полярность e_2 изменится на противоположную и ток i_{a1} будет протекать, преодолевая противоЭДС e_{2a} , т. е. поток энергии будет снова направлен из E_0 в питающую сеть. Одновременно с открытием тиристора T_1 выключается тиристор T_2 (при условии $X_a = 0$), т. к. к нему будет приложена суммарная ЭДС $e_{2a} + e_{2b}$ в запирающем направлении в течение интервала β . Поскольку тиристор закрывается не мгновенно, а в течение времени $t_{\text{выкл}}$, определяемого из его паспортных данных, то длительность интервала β должна быть не менее $\omega t_{\text{выкл}}$: $\beta \geq \omega t_{\text{выкл}}$. Угол β называется углом опережения. Точку $(\pi - \beta)$ можно обозначить так же, как угол α (рис. 4.2, б), известный как угол управления.

Отсюда зависимость между этими двумя углами $\alpha + \beta = \pi$. Мгновенное значение противоЭДС $e_{d\beta}$, создаваемой вторичной обмоткой трансформатора протеканию тока i_d источника E_0 , представлена на рис. 4.2, в.

Среднее значение этой функции:

$$E_{d\beta} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} \sqrt{2} E_2 \sin \theta d\theta = -\frac{2\sqrt{2} E_2}{\pi} \cos \beta. \quad (4.1)$$