

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Запропоновано векторний принцип керування інвертором напруги на основі узагальнених просторових векторів струму й напруги в обертовій системі координат для компенсації реактивної потужності й стабілізації напруги.

Предложен векторный принцип управления инвертором напряжения на основе обобщенных пространственных векторов тока и напряжения во вращающейся системе координат для компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения.

A vectorial principle of voltage inverter control has been offered on the basis of the unified spatial current/voltage vectors in the revolving system of coordinates for compensation of reactive power and stabilizing the voltage.

Необходимость поддержания напряжения тяговой сети на требуемом уровне предопределяет необходимость его регулирования. При этом объединение функций компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения имеет большие перспективы. Успешное решение этой проблемы возможно плавным амплитудно-фазовым регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) в широких пределах с помощью АИН с ШИМ и релейно-векторной системой управления.

Наиболее важной проблемой при разработке законов и алгоритмов управления напряжением ВДТ с помощью АИН с ШИМ является формирование управляющих воздействий, в функции которых следует реализовать регулирование. В этом отношении наиболее перспективным направлением является использование теории I_x , I_y мгновенной мощности на базе обобщенных пространственных векторов напряжения и тока сети.

Целью исследования является разработка на основе I_x , I_y теории мгновенной мощности в синхронно вращающихся координатах системы автоматического управления напряжением и фазой ВДТ на основе АИН с ШИМ для стабилизации напряжения тяговой сети.

Результаты исследования показали, что любые трехфазные системы (напряжения, тока и др.), мгновенные значения которых равны нулю, могут быть представлены в двумерном пространстве с помощью обобщенных пространственных векторов [1]. Если вектор напряжения фазы A расположить, например, вдоль горизонтальной оси, а векторы напряже-

ний фаз B и C повернуть соответственно на 120° и 240° в положительном направлении, то результирующий (обобщенный) вектор напряжения определяется согласно выражению

$$\bar{U} = \frac{2}{3}(u_A + \bar{\alpha}u_B + \bar{\alpha}^2u_C) = U_\alpha + jU_\beta, \quad (1)$$

где $2/3$ – согласующий коэффициент, найденный из условия инвариантности мощности; u_A, u_B, u_C – мгновенные значения напряжений; $\bar{\alpha} = e^{j120^\circ}$, $\bar{\alpha}^2 = e^{j240^\circ}$ – единичные векторы поворота соответственно на 120° и 240° ; U_α, U_β – проекции результирующего вектора на неподвижную систему координат α, β , вещественная ось α которой совмещена с вектором напряжения фазы A .

Согласно (1) преобразование трехфазной системы A, B, C в двухфазную α, β производится с помощью матричного соотношения

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Обратный переход реализуется как

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_\alpha; \\ u_B &= -0,5U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta; \\ u_C &= -0,5U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В предлагаемой системе АИН с ШИМ с входным LC-фильтром подключен непосредственно на постоянное напряжение тяговой сети. При этом с помощью одного полностью управляемого инвертора, коммутируемого с высокой частотой, можно регулировать в широких пределах величину и фазу напряжения ВДТ и, следовательно, значение и знак реактивной мощности. Так как регулирование напряжения тяговой сети реализуется на стороне переменного тока, то вентильный блок тяговой подстанции может быть выполнен нерегулируемым, который по отношению к сети обладает практически активным сопротивлением (без учета углов коммутации), а пульсации выпрямленного напряжения существенно ниже, чем в регулируемом вентильном блоке. Минимизация гармоник, генерируемых выпрямителем, реализуется с помощью фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), настроенных, например, на 5-ю и 7-ю гармоники.

Преобразователи фаз ПФ1...ПФ3, реализованные на основании (2) и (3) предназначены для прямого (ПФ1 и ПФ2) и обратного перехода (ПФ3) от трехфазной системы A, B, C к двухфазной α, β .

Пространственное положение результирующего вектора \bar{U}_1 напряжения первичной обмотки трансформатора Tr реализуется с помощью вычислительного устройства ВУ2 на основании выражений:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{U_{1\alpha}}{U_1}; \\ \sin \alpha &= \frac{U_{1\beta}}{U_1}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $U_1, U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ – модуль и проекции обобщенного пространственного вектора \bar{U}_1 на оси α, β .

Фазовый сдвиг между векторами напряжения и тока первичной обмотки трансформатора вычисляется с помощью ВУ1 согласно соотношениям

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \frac{I_x}{I}; \\ \sin \varphi_1 &= \frac{I_y}{I}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где I, I_x, I_y – модуль и ортогональные составляющие вектора тока в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения \bar{U}_1 .

Согласно обозначениям, принятым на векторной диаграмме рис. 2, ортогональные составляющие напряжения вторичной обмотки ВДТ во вращающейся системе координат и его модуль при полной компенсации реактивной мощности сети определяются как

$$\left. \begin{aligned} U_{Dy} &= U_C \sin \varphi_1; \\ U_{Dx} &= U_C (1 - \cos \varphi_1); \\ U_D &= \sqrt{U_{Dx}^2 + U_{Dy}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где φ_1 – фазовый сдвиг между напряжением первичной обмотки трансформатора и током сети.

Указанные составляющие напряжения после преобразования координат из вращающейся системы в неподвижную с помощью ПК2 и преобразования фаз с помощью ПФ3 поступают в виде трехфазных синусоидальных управляющих (задающих) воздействий на вход АИН с ШИМ. Амплитудное значение выходного напряжения АИН (напряжение первичной обмотки ВДТ) составляет при синусоидальной ШИМ

$$U_{1D} = 0,5mU_d = 0,5mK_{cx}U_{1\phi} / K_{тр}, \quad (11)$$

где $m = U_{зад} / U_{оп}$ – коэффициент модуляции; $U_{зад}, U_{оп}$ – напряжение задания и опорное; $K_{cx} = 2,34$ – коэффициент схемы трехфазного мостового выпрямителя; $U_{1\phi}, K_{тр}$ – фазное напряжение первичной обмотки силового трансформатора и его коэффициент трансформации.

Из совместного решения (10) и (11) с учетом, что модуль результирующего вектора напряжения равен амплитуде его фазного напряжения, находится требуемое значение коэффициента трансформации ВДТ

$$K_{BD} = \frac{U_D}{U_{1D}} = \frac{K_{тр} \sqrt{2(1 - \cos \varphi_1)}}{0,5mK_{cx}}. \quad (12)$$

Напряжение U_1 на первичной обмотке силового трансформатора согласно рис. 2

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_C + \dot{U}_{1D} = \dot{U}_C + \dot{U}_{1D} e^{\pm j\beta}, \quad (13)$$

где β – фазовый сдвиг между напряжениями вторичной обмотки ВДТ и сети.

Приведенные соотношения и векторная диаграмма рис. 2 показывают, что плавное регулирование генерируемой или потребляемой реактивной мощности, а также переход из одного режима в другой реализуется путем опережающего или отстающего регулирования вели-

