Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XX, вып. 1, 1976 г.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОММУТАЦИИ СД В ШАГОВОМ РЕЖИМЕ

З.Б.СЛЕПЦОВА

Устройство медленного поворота барабана шаровой мельницы по схеме тиристорный непосредственный преобразователь частоты – синхронный двигатель (ТНПЧ – СД) с упрощенной помехоустойчивой системой распределения импульсов[x] реализует поочередное включение обмоток статора двигателя мельницы на источник постоянного напряжения в определенной последовательности.

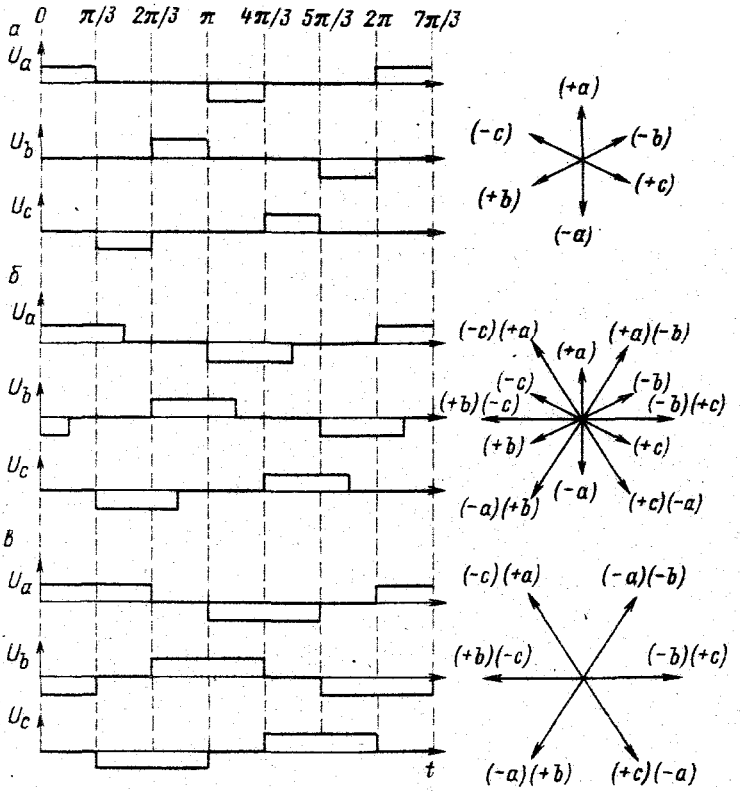
В процессе работы такого привода предполагается сохранять напряжение источника питания ТНПЧ и ток возбуждения СД постоянными для конкретного режима работы. Поэтому такой привод следует отнести к разряду шаговых и для его исследования пользоваться методами и терминологией, принятыми в теории шагового привода [I].

Поскольку СД имеет независимое возбуждение, целесообразно применять разнополярную коммутацию его статорных обмоток. Циклограммы коммутации (см. рисунок) охватывают все принципиально возможные случаи разнополярного переключения обмоток трехфазного двигателя: а) поочередная 6-тактная коммутация; в каждый момент времени возбуждена только одна обмотка статора СД; б) парная несимметричная I2-тактная коммутация; при нечетных тактах коммутации возбуждаются одновременно две обмотки статора СД, при четных – одна; в) парная симметричная 6-тактная коммутация; в каждый момент времени возбуждены две обмотки статора СД. Электрические состояния двигателя, соответствующие трем указанным способам коммутации, представлены на рисунке системами изображающих пространственных векторов напряжения статора.

Напряжения на обмотках изменяются практически мгновенно, поэтому можно считать, что при каждом переключении изображающий пространственный вектор напряжения мгновенно поворачивается на угол, равный электрическому шагу двигателя $\alpha = \frac{2\pi}{n}$, где n – число тактов коммутации. Из диаграмм видно, что в случае несимметричной коммутации наблюдается уменьшение шага в 2 раза, а также резкая неравномерность амплитуды результирующего вектора напряжения для четных и нечетных шагов.

---

[x] И.М.Столяров, З.Б.Слепцова. Привод поворота шаровых мельниц по схеме ТНПЧ – СД. (См. настоящий сборник).



Циклограммы коммутации обмоток трехфазного двигателя

Система уравнений, описывающих работу рассматриваемого привода без учета успокоительной обмотки СД, может быть записана в виде

$$
\begin{aligned}
& i_m r + \frac{d\Psi_m}{dt} = u_m, \quad m = a, b, c; \\
& i_f r_f + \frac{d\Psi_f}{dt} = u_f; \qquad (I) \\
& J \frac{d^2 \delta_M}{dt^2} + M_c = M_{дв},
\end{aligned}
$$

где r и r_f – активные сопротивления цепей соответственно фазы статора и возбуждения; $u_m, u_f, i_m, i_f, \Psi_m, \Psi_f$ – мгновенные значения напряжения, тока и потокосцепления соответствующих обмоток статора и ротора; $M_{дв}$ – мгновенное значение статического синхронизирующего момента на валу СД; J – суммарный момент инерции двигателя и нагрузки, приведенный к валу СД; M_c – момент статических сопротивлений; δ_M – геометрический угол поворота ротора.

Индуктивности и взаимные индуктивности обмоток СД являются известными периодическими функциями электрического угла поворота ротора (угол между осью фазы a и продольной осью ротора) δ [2]:

$$\delta = p\delta_m ,$$

где p – число пар полюсов СД.

Поэтому для потокосцеплений ненасыщенного СД справедливы следующие соотношения:

$$\begin{Vmatrix} l_0+l_2\cos 2\delta & m_0+m_2\cos\left(2\delta-\frac{2\pi}{3}\right) & m_0+m_2\cos\left(2\delta+\frac{2\pi}{3}\right) & M_{ad}\cos\delta \\ m_0+m_2\cos\left(2\delta-\frac{2\pi}{3}\right) & l_0+l_2\cos 2\left(\delta-\frac{2\pi}{3}\right) & m_0+m_2\cos 2\delta & M_{ad}\cos\left(\delta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ m_0+m_2\cos\left(2\delta+\frac{2\pi}{3}\right) & m_0+m_2\cos 2\delta & l_0+l_2\cos 2\left(\delta+\frac{2\pi}{3}\right) & M_{ad}\cos\left(\delta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{ad}\cos\delta & M_{ad}\cos\left(\delta-\frac{2\pi}{3}\right) & M_{ad}\cos\left(\delta+\frac{2\pi}{3}\right) & L_f \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_f \end{Vmatrix} \quad (2)$$

В уравнениях (2) M_{ad} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора при совпадении их осей; L_f – индуктивность обмотки возбуждения ротора.

Коэффициенты l_0, m_0, l_2, m_2 выражаются через индуктивности, которыми обычно характеризуется синхронная машина:

$$l_0=\frac{1}{3}(L_d+L_q+L_0); \quad m_0=\frac{1}{3}\left(L_0-\frac{L_d+L_q}{2}\right); \quad l_2=m_2=\frac{1}{3}(L_d-L_q).$$

Тогда статический синхронизирующий момент при фиксированных токах в обмотках ($i_m = const$; $i_f = const$) может быть выражен аналитически как производная электромагнитной энергии системы по геометрическому углу поворота ротора:

$$M_{\partial\delta}=\frac{dW_{эм}}{d\delta_м}=p\frac{dW_{эм}}{d\delta}=p\left[\frac{1}{3}(L_d-L_q)\left(\frac{1}{2}i_b^2+\frac{1}{2}i_c^2-i_a^2+\right.\right.$$

$$+i_a i_b+i_a i_c-2i_b i_c)\sin 2\delta+\frac{1}{\sqrt{3}}(L_d-L_q)\left(\frac{1}{2}i_c^2-\frac{1}{2}i_b^2+i_a i_b-\right.$$

$$\left.-i_a i_c\right)\cos 2\delta+M_{ad}\left(\frac{1}{2}i_b i_f+\frac{1}{2}i_c i_f-i_a i_f\right)\sin\delta+$$

$$\left.+\frac{\sqrt{3}}{2}M_{ad}(i_b i_f-i_c i_f)\cos\delta\right] . \quad (3)$$

Пользуясь формулой (3), получаем угловые характеристики момента СД для интересующих нас случаев:

а) при возбуждении одной фазы статора

$$M_{\partial в} = p\left[\frac{1}{3}(L_d - L_q)I^2 \sin 2\theta + M_{ad} I i_f \sin\theta\right]; \qquad (4)$$

б) при возбуждении двух фаз статора

$$M_{\partial в} = p\left[(L_d - L_q)I^2 \sin 2\theta + \sqrt{3}\, M_{ad} I i_f \sin\theta\right], \qquad (5)$$

где I – установившееся значение тока в фазе статора; $\theta = \gamma - \delta$ – угол между вектором результирующей н.с. статора и продольной осью ротора; γ – угол между осью фазы a и вектором результирующей н.с. статора.

Очевидно, что формула (4) соответствует случаю поочередной коммутации обмоток СД, а формула (5) – симметричной парной коммутации (см. таблицу). При несимметричной парной коммутации формула (4) соответствует нечетным тактам, а формула (5) – четным, т.е. от шага к шагу активная составляющая статического синхронизирующего момента меняется в $\sqrt{3}$ раза, а реактивная – в 3 раза, что приводит к различным условиям отработки четных и нечетных шагов, а в случае достаточно большого момента нагрузки – к разной статической ошибке, т.е. к неравномерным шагам.

Сравнительные характеристики способов коммутации обмоток СД от ТНПЧ с индукционным распределителем импульсов

Коммутация	Рисунок	Последовательность переключений обмоток СД	Число тактов	Цена шага, эл.радиан	Амплитуды составляющих статического синхронизирующего момента		Ширина ярма ИРИ, град.
					активной	реактивной	
Поочередная	a	$(+a)-(-c)-(+b)-(-a)-\ldots$	6	$\frac{\pi}{3}$	$pM_{ad}Ii_f$	$\frac{1}{3}p(L_d-L_q)I^2$	30
Парная несимметричная	$б$	$(+a)(-b)-(+a)(+a)(-c)-\ldots$	12	$\frac{\pi}{6}$	Для нечетных тактов: $\sqrt{3}\,pM_{ad}Ii_f$	$p(L_d-L_q)I^2$	45
					Для четных тактов: $pM_{ad}Ii_f$	$\frac{1}{3}p(L_d-L_q)I^2$	
Парная симметричная	$в$	$(+a)(-b)-(+a)(-c)-(+b)(-c)-\ldots$	6	$\frac{\pi}{3}$	$\sqrt{3}pM_{ad}Ii_f$	$p(L_d-L_q)I^2$	60

Для упрощения системы распределения импульсов ТНПЧ, скважность импульсов выходного напряжения преобразователя принимается постоянной и определяется шириной ярма индукционного распределителя импульсов. Поэтому целесообразно отказаться от варианта несимметричной коммутации и принять за базовые циклограммы поочередной и симметричной парной коммутации, так как они обеспечивают равномерную отработку шагов.

Таким образом, максимальный статический синхронизирующий момент, развиваемый двигателем, зависит от расчетных параметров машины, способа коммутации и значений токов в обмотках статора и ротора. Если расчетные параметры жестко определяются в каждом случае типом СД шаровой мельницы, то способ коммутации может быть выбран для каждой конкретной установки, а значения рабочих токов в обмотках машины могут варьироваться в допустимых пределах и выбираются оптимальными в зависимости от загрузки барабана мельницы.

Известно [3], что статический момент сопротивления шаровой мельницы

$$M_C = M_{TP} + G x \sin \alpha \ , \qquad (6)$$

где M_{TP} – момент сопротивления, обусловленный трением в подшипниках и трансмиссии шаровой мельницы с „мертвой" загрузкой; G – вес шаровой загрузки и сырья; x – расстояние центра тяжести загрузки от оси вращения; α – угол перекоса заполнения.

Максимального значения M_C достигает при повороте заполнения на угол естественного откоса шаров ($\alpha \cong 45^0$). При этом $M_{TP} \ll G x \sin \alpha$ и можно считать

$$M_{C\,расч} = \frac{1}{\sqrt{2}} G x. \qquad (7)$$

Для обеспечения нормальной работы шагового привода в соответствии с имеющимися рекомендациями [1] следует соблюдать соотношение

$$M_{дв\,max} \cong 2 M_{C\,расч}. \qquad (8)$$

Пользуясь выражениями (4), (5), (7), (8) и пренебрегая в формулах (4) и (5) реактивной составляющей статического синхронизирующего момента, получим расчетную формулу для выбора рабочих токов в обмотках двигателя:

$$\sqrt{2}\, G x \cong \beta M_{aa} I i_f , \qquad (9)$$

где $\beta = 1$ – для поочередной коммутации; $\beta = \sqrt{3}$ – для симметричной парной коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. Под редакцией М.Г.Чиликина. М., „Энергия", 1971.

2. Кононенко Е.В., Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Электрические машины. (Специальный курс). М., „Высшая школа", 1975.

3. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий. М., „Недра", 1966.