

Диаграммы тока и свойства синхронной машины при постоянном угле рассогласования

КУЦЕВАЛОВ В. М., ИВАНОВ Г. Г., ДИРБА Я. А.

Рига

В теории машин переменного тока, как известно, широкое применение находят геометрические места (диаграммы) тока якоря, однако при анализе вентильных машин (ВМ), исполнительным элементом которых также является машина переменного тока, подобные диаграммы в настоящее время практически не применяются [Л. 1—4]. Вместе с тем метод исследования общих свойств и характеристик машины, основанный на использовании диаграмм тока, отличается исключительной наглядностью.

В данной статье рассматриваются диаграммы тока и на базе их проводится анализ свойств синхронного явнополюсного двигателя (СД), работающего совместно с инвертором напряжения и датчиком положения ротора. В этом случае угол рассогласования θ между основными гармониками векторов фазного напряжения U_1 и э. д. с. холостого хода E_0 можно считать постоянным. Частота вращения СД при этом, естественно, может быть переменной.

Выбор данного режима в качестве исследуемого объясняется тем, что свойства СД, работающего совместно с инвертором напряжения, изучены значительно меньше по сравнению с СД, работающим с инвертором тока.

Предполагается, что инвертор напряжения является полностью управляемым, магнитная цепь машины ненасыщена, а фазные токи и напряжения синусоидальны.

Анализ работы инвертора напряжения [Л. 5] показывает, что можно выделить участки его цепей, в которых протекает ток, пропорциональный активной, реактивной или алгебраической сумме обеих составляющих тока якоря I_1 . Это обстоятельство позволяет применить в вентильном двигателе (ВД) несколько обмоток возбуждения, а закон управления током возбуждения, приведенным к обмотке якоря, в общем случае выразить в форме:

$$I'_2 = I'_{2c} + I_1 (k_1 \cos \varphi + k_2 \sin \varphi), \quad (1)$$

где I'_{2c} — постоянная составляющая тока возбуждения, обес- печиваемая, например, независимым источником питания; k_1, k_2 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от схемы преобразователя и от коэффициента приведения обмотки возбуждения к обмотке якоря.

Уравнения диаграммы тока. Из векторной диаграммы Blondеля для явнополюсной синхронной машины (СМ) с учетом (1) можно получить уравнение тока якоря в прямоугольной системе координат [Л. 6]:

$$a_{11} I_{1a}^2 + 2a_{12} I_{1a} I_{1p} + a_{22} I_{1p}^2 + 2a_{13} I_{1a} + 2a_{23} I_{1p} + a_{33} = 0, \quad (2)$$

где I_{1a} и I_{1p} — активная и реактивная составляющие тока якоря; $(a_{11} \dots a_{33})$ — коэффициенты общего уравнения кривой:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= r_1 \left[1 + \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin^2 \theta \right]; \\ a_{12} &= \frac{r_1}{2} \left[\frac{L_{ad}}{L_q} (k_1 \cos \theta - k_2 \sin \theta) - \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin 2\theta \right]; \\ a_{22} &= r_1 \left[1 + \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \cos^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos \theta \right]; \\ a_{13} &= \frac{U_1}{2} \left[\frac{L_d}{L_q} k_1 \sin \theta - \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin^2 \theta + 1 \right] - \\ &\quad - r_1 \frac{L_d}{L_q} I'_{2c} \sin \theta; \\ a_{23} &= \frac{U_1}{2} \left[\frac{L_d}{L_q} k_2 \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin 2\theta \right] + \\ &\quad + r_1 \frac{L_d}{L_q} I'_{2c} \cos \theta; \\ a_{33} &= U_1 I'_{2c} \frac{L_d}{L_q} \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь L_d, L_q — индуктивности, соответствующие синхронным сопротивлениям по продольной и поперечной осям машины; L_{ad} — индуктивность, соответствующая сопротивлению реакции якоря по продольной оси машины; r_1 — активное сопротивление обмотки якоря.

Из (2) и (3) видно, что геометрическое место тока якоря СМ, работающей в данном режиме, представляет собой кривую второго порядка, на форму которой значительно влияют коэффициенты k_1 и k_2 .

Анализ диаграммы тока. Анализ общих свойств ВМ по диаграмме тока покажем на примере частного случая, когда машина имеет одну обмотку возбуждения, включенную последовательно на входе преобразователя без дополнительного потребителя реактивной энергии [Л. 7]. При этом полагаем, что падение напряжения в обмотке возбуждения по сравнению с фазным напряжением U_1 мало, а включение обмотки возбуждения на входе инвертора напряжения не нарушает работы последнего.

Очевидно, выражения (1) и (3) справедливы для данного случая, если в них положить $k_2 = 0$ и $I'_{2c} = 0$. Уравнение (2) в этом случае также представляет собой кривую второго порядка, свойства которой удобно характеризовать инвариантами A, I, D , координатами ее центра X_0, Y_0 , эксцентриситетом e и углом наклона α одной из ее осей:

$$A = - \left[1 + \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin^2 \theta - k_1 \frac{L_{ad}}{L_q} \sin \theta \right] \times \\ \times (L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta) \frac{1}{L_q}; \quad (4)$$

$$I = 1 + \frac{1}{L_q} (L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta); \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{L_q} \left[(L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta) - \frac{1}{4L_q} (L_{ad} k_1 \cos \theta)^2 \right]; \quad (6)$$

$$X_0 = \frac{U_1 \left[L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta - \right. \\ \left. \frac{1}{2} \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) L_{ad} k_1 \sin \theta \cos^2 \theta \right]}{2r_1 \left[L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta - \right. \\ \left. - \frac{1}{L_q} \left(\frac{1}{2} L_{ad} \cos \theta \right)^2 \right]}; \quad (7)$$

$$Y_0 = \frac{-U_1 L_{ad} \cos \theta \left[1 + \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin^2 \theta - \frac{L_{ad}}{L_q} \sin \theta \right]}{4r_1 \left[L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta - \frac{1}{L_q} \left(\frac{1}{2} L_{ad} \cos \theta \right)^2 \right]}; \quad (8)$$

$$e = \sqrt{\frac{2 \sqrt{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right)^2 - 2 \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \frac{L_{ad}}{L_q} \times} \\ \times k_1 \sin \theta + \left(\frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \right)^2} \\ + \sqrt{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right)^2 - 2 \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \sin \theta + \left(\frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \right)^2}} \\ \frac{1 + \frac{L_d}{L_q} - \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \sin \theta +}{\times k_1 \sin \theta + \left(\frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \right)^2} + \dots \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right) \sin 2\theta - \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \cos \theta}{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right) \cos 2\theta + \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \sin \theta}. \quad (10)$$

Параметры, определяемые формулами (4)–(10), зависят от коэффициента k_1 , поэтому целесообразно выделить и рассмотреть отдельно ряд граничных значений этого коэффициента.

Во-первых,

$$0 < k_1 < \frac{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos^2 \theta} - \sin \theta}{\frac{1}{2} \frac{L_{ad}}{L_q} \cos^2 \theta}.$$

При этом $D > 0$, $A/I < 0$, а диаграмма тока якоря представляет собой эллипс (рис. 1, кривая 1)*. На рис. 2 представлена соответствующая механическая характеристика, рассчитанная по известным выражениям:

$$\left. \begin{aligned} M_{эм} &= mp \left[L_{ad} I'_2 I_1 \cos(\theta - \varphi) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{I_1^2}{2} (L_d - L_q) \sin 2(\theta - \varphi) \right]; \\ n &= \frac{30}{\pi} \frac{m (U_1 I_1 \cos \varphi - I_1^2 r_1)}{M_{эм}}, \end{aligned} \right\}$$

где φ — угол сдвига фаз между током I_1 и напряжением; ВМ в этом случае может работать как в режиме электромагнитного тормоза, так и в режиме генератора.

* На рис. 1 ток якоря представлен в относительных единицах, при этом $I_{1б} = U_1/r_1$.

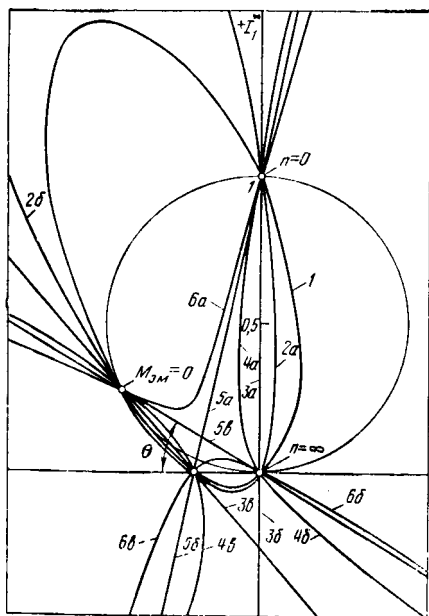


Рис. 1. Диаграммы тока вентиляльной машины.

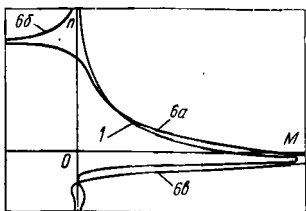


Рис. 2. Механические характеристики вентиляльной машины.

Во-вторых,

$$k_1 = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos^2 \theta} - \sin \theta}{\frac{1}{2} \frac{L_{ad}}{L_q} \cos^2 \theta}.$$

При данном значении k_1 годограф тока представляет собой параболу. Очевидно, постепенное увеличение k_1 удлиняет продольную ось эллипса годографа тока и при определенном значении k_1 происходит разрыв кривой годографа на две отдельные зоны (рис. 1, кривые 2а и 2б).

В-третьих,

$$\frac{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos^2 \theta} - \sin \theta}{\frac{1}{2} \frac{L_{ad}}{L_q} \cos^2 \theta} < k_1 < \frac{L_{ad}}{L_d \sin \theta}, \quad D < 0, A \neq 0.$$

Диаграмма тока (рис. 1, кривые 4а, 4б, 4в) переходит в гиперболу, а соответствующая механическая характеристика точками $I_1=0$, $n \rightarrow \infty$ и $I_1 \rightarrow \infty$, $M_{эм} \rightarrow \infty$ делится на три возможные зоны работы.

В-четвертых, особенно следует отметить промежуточное значение

$$k_{10} = \frac{\left[1 + \left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right) \sin^2 \theta\right] L_q}{L_{ad} \sin \theta}, \quad D < 0, A = 0.$$

В этом случае диаграмма тока представляет собой пару пересекающихся прямых (рис. 1, прямые 3а, 3б, 3в). Прямая 3а соответствует режиму работы двигателя с постоянным $\cos \varphi = 1$ при любой частоте вращения. При $k_1 < k_{10}$ двигатель всегда будет работать с отстающим током якоря, а при $k_1 > k_{10}$ — с опережающим током якоря.

В-пятых, при

$$k_1 = \frac{L_{ad}}{L_d \sin \theta}, \quad D < 0, A = 0$$

диаграмма тока опять представляет собой пару пересекающихся прямых (рис. 1, прямые 5а, 5б, 5в). Одна из них проходит через начало координат под углом $\varphi = \theta - 90^\circ$ и не имеет реальной механической характеристики, так как каждой ее точке соответствует $n \rightarrow \infty$.

В-шестых, при дальнейшем увеличении k_1 диаграммой тока является гипербола (рис. 1, кривые 6а, 6б, 6в), а соответствующая механическая характеристика разделена на три рабочие зоны (рис. 2, кривые 6а, 6б, 6в). При работе ВМ в режиме электромагнитного тормоза во втором квадранте механической характеристики двигатель имеет граничную частоту вращения.

Из рис. 1 и 2 следует, что ВД с последовательным возбуждением может обладать большим разнообразием характеристик в зависимости от значения коэффициента k_1 , которое, в частности, можно изменять, применяя известный метод шунтирования обмотки возбуждения.

Анализ показывает, что лучшими энергетическими показателями ВД будет обладать при работе с $k_1 = k_{10}$. В этом случае, как отмечалось выше, $\cos \varphi = 1$ при любой частоте вращения. Однако данный вывод был получен без учета насыщения магнитной цепи, а также того обстоятельства, что при изменении частоты вращения происходит некоторое изменение формы кривой тока и напряжения, поэтому, строго говоря, нельзя считать $\theta = \text{const}$. Реальный ВД при таком значении коэффициента k_1 будет работать с $\cos \varphi$, близким к единице.

На диаграмме рис. 1 имеется ряд характерных точек, через которые проходят все годографы тока. Точке $I_{1а} = U_1/r_1$, $I_{1б} = 0$ соответствует пуск двигателя ($n=0$). В случае $I_1=0$ частота вращения $n \rightarrow \infty$. При прохождении годографа через эти две точки меняется направление вращения ротора двигателя. В точке

$$I_{1а} = I'_2 \frac{L_{ad}}{L_d} \sin \theta, \quad I_{1б} = -I'_2 \frac{L_{ad}}{L_d} \cos \theta$$

значение $M_{эм} = 0$.

Через указанные три точки можно провести окружность, которая определяет области положительных и отрицательных

значений электромагнитной мощности $P_{эм}$ [Л. 6]. В точках пересечения годографа тока с этой окружностью $P_{эм}=0$.

На рис. 3 в качестве примера приведены расчетные и экспериментальные механические характеристики ВД, выполненного на базе машины С051-4, при нескольких значениях угла θ и $k_1=k_{10}$. Как видно из рисунка, приведенные характеристики двигателя с последовательным возбуждением. Регулировочные характеристики $n=f(U_1)$ таких ВД получаются практически линейными, когда синхронные индуктивные сопротивления машины значительно больше активного сопротивления r_1 . Возможно также регулирование частоты вращения данного ВД изменением θ , k_1 и r_1 .

Практическое построение диаграммы тока. В теории машин переменного тока диаграммы находят применение не только для анализа общих свойств, но и для определения рабочих характеристик. В связи с этим представляет значительный интерес разработка практической методики построения годографа тока якоря и соответствующих шкал для определения основных электромагнитных величин, используемых при построении характеристик ВД. Рассмотрим эти вопросы на примере явнополюсного ВД с параллельным возбуждением ($I_2=const$), работающего при неизменном значении угла θ . Годограф тока якоря ВМ в этом случае представляет собой эллипс [Л. 6], эксцентриситет которого зависит только от соотношения индуктивностей ВМ, причем

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{L_q}{L_d}}, \quad (11)$$

где a, b — полуоси эллипса.

Построить эллипс можно с помощью двух окружностей, имеющих общий центр и различные радиусы-векторы R_1 и R_2 , вращающиеся в противоположные стороны. Выбрав произвольно $R_1=AP$ (рис. 4), из условия (11) определяем $R_2=AH$. Затем выбираем направление осей эллипса и соответствующим суммированием векторов R_1 и R_2 строим годограф.

Для определения осей координат комплексной плоскости используем известные выражения центра эллипса на координатной плоскости и угла наклона главной оси α . Согласно общей теории геометрических мест [Л. 8] в данном случае можно построить линейную шкалу частоты вращения (см. рис. 4, прямая — n^* , n^*). Для определения $\cos \varphi$, к. п. д. η , электромагнитной $P_{эм}$ и активной составляющей P_1 мощностей можно использовать окружность электромагнитной мощности, а в качестве линейной шкалы взять ось действительных величин.

Полная диаграмма тока изображена на рис. 4. В качестве примера на диаграмме сделаны необходимые построения для произвольной точки B . Электромагнитной мощности $P_{эм}^*$ соответствует отрезок прямой NM , потерям в меди $\Delta p^* = ON$, $\cos \varphi = OK$, $\eta = DF$.

Вышерассмотренная методика определения электромагнитных величин по диаграмме тока применима и для ВД с последовательным возбуждением или с несколькими обмотками возбуждения, если диаграммой является эллипс. В случае, когда диаграмма тока представляет собой гиперболу, параболу или пару пересекающихся прямых, также возможно построение шкал для определения основных электромагнитных величин, однако шкала частоты вращения при этом получается нелинейной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубенский А. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока. М.: Энергия, 1967.
2. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока автоматических устройств. М.: Наука, 1966.

Рис. 3. Расчетные и экспериментальные механические характеристики вентиляльной машины.

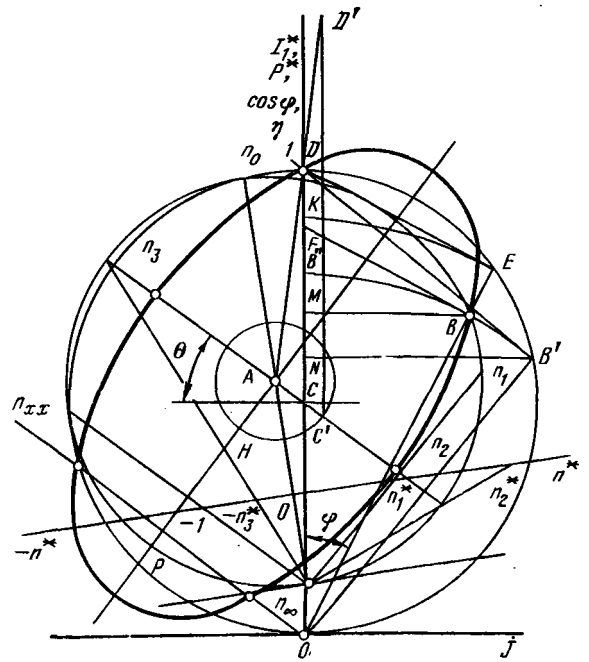
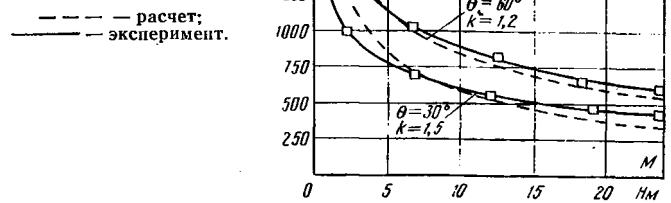


Рис. 4. Построение полной диаграммы тока вентиляльной машины.

3. Аракелян А. К., Афанасьев А. А., Чиликин М. Г. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. М.: Энергия, 1977.
4. Лутидзе Ш. И. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. М.: Наука, 1968.
5. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии/ Крогерис А. Ф., Рашевец К. К., Рутманис Л. А. и др. — Рига: Зинатне, 1969.
6. Иванов Г. Г. Диаграмма тока синхронной машины, работающей в специальном режиме при постоянном угле рассогласования. — В кн.: Бесконтактные электрические машины. Рига: Зинатне, 1976, № 15.
7. Иванов Г. Г., Дирба Я. А., Куцевалов В. М. Годограф тока вентиляльной машины с последовательным возбуждением. — Изв. АН Латв.ССР. Серия физических и технических наук, 1977, № 1.
8. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. М.: Госэнергониздат, 1949.