

О РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОТ ЦИКЛОКОНВЕРТОРА

В теории обобщенных электромеханических преобразователей известны различные формы записи дифференциальных уравнений трехфазной асинхронной машины (АМ), различающиеся в зависимости от принятой системы координат. Установлено, что при тиристорном управлении короткозамкнутым АМ наиболее целесообразна система координат, неподвижная по отношению к статору [1]. При этом количество фазных осей в системе координат может быть различным. В частности, широко распространена система с ортогональными фазными осями — α и β . В такой системе содержится минимальное число дифференциальных уравнений, описывающих АМ, что обычно экономит время расчета переходных процессов на ЭЦВМ. Однако при цифровом моделировании системы "циклоконвертор с естественной коммутацией — АМ" ("Ц—АМ") использование координат α и β приводит к необходимости пересчета на каждом временном интервале реального трехфазного напряжения циклоконвертора в напряжение по осям α, β . Получаемые в результате решения токи статора по осям α, β затем необходимо преобразовать в токи статора по осям a, b, c трехфазной АМ. Последнее позволяет учесть обратную связь от нагрузки на тиристорный преобразователь, которая обычно рассматривается, как действие токов статора на сохранение проводимости соответствующих тиристоров силовой цепи преобразователя. Вместе с тем исследования частотно-управляемого асинхронного электропривода свидетельствуют, что обратная связь по току не исчерпывает действия АМ на преобразователь, в особенности на циклоконвертор с естественной коммутацией. В частности, включение тиристоров не определяется полностью режимом управления, так как зависит и от значения э.д.с. в фазах статора АМ. При этом возможно под действием э.д.с. нарушение заданного порядка коммутации тиристоров, что существенно изменяет выходное напряжение циклоконвертора. Влияние э.д.с. АМ проявляется в наибольшей степени при работе машины с абсолютными скольжениями $|\beta| \leq \beta_n$ на частотах $f \geq 0,2 f_n$.

Поэтому при моделировании системы "Ц—АМ" необходимо корректно организовывать взаимодействие между преобразователем и машиной с учетом как тока, так и э.д.с. статора АМ.

В силу изложенного целесообразно дифференцированные уравнения АМ записать через токи в реальных фазных координатах a, b, c , выразив в этих уравнениях в явном виде фазные э.д.с. статора. Такая форма записи дифференциальных уравнений позволяет непосредственно получить при решении координаты, воздействующие через силовую цепь на коммутацию тиристоров циклоконвертора.

Для этого, воспользовавшись известными дифференциальными уравнениями АМ в осях $\alpha-\beta$, а также соотношениями между переменными в этой системе и переменными в трехфазной системе фазных координат статора

а, b, с, получим при изолированных нейтральных следующую систему дифференциальных уравнений, записанную относительно токов статора и ротора:

$$\begin{aligned} u_{Sq} &= R_S i_{Sq} + L_S \frac{di_{Sq}}{dt} + L_m \frac{di_{Rq}}{dt}; \\ 0 &= R_R i_{Rq} + L_R \frac{di_{Rq}}{dt} + L_m \frac{di_{Sq}}{dt} - e_{bq}, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_{Sq} – фазное мгновенное значение напряжения статора; i_{Sq} , i_{Rq} – фазные мгновенные значения токов статора и ротора; L_S , L_R – полные индуктивности фазы статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность между статором и ротором; e_{bq} – фазное мгновенное значение э.д.с. вращения АМ,

$$e_{bq} = \frac{\omega_R L_R}{\sqrt{3}} (i_{Rq} + 2 i_{R(q-1)} + K_R (i_{Sq} + 2 i_{S(q-1)})).$$

Здесь q – индекс координатной оси фазы; $q = a, b, c$; $(q - 1) = c, a, b$; ω_R – электрическая скорость ротора; K_R – коэффициент связи, $K_R = L_m/L_R$.

Уравнения (1) можно записать в виде

$$\frac{di_{Sq}}{dt} = \frac{1}{L_S} (u_{Sq} - R_S i_{Sq} - L_m \frac{di_{Rq}}{dt}); \quad (2)$$

$$\frac{di_{Rq}}{dt} = \frac{1}{L_R} (e_{bq} - R_R i_{Rq} - L_m \frac{di_{Sq}}{dt}). \quad (3)$$

Выполним подстановку тождества (2) во второе уравнение, а тождества (3) – в первое уравнение системы (1). После соответствующих преобразований получим

$$\begin{aligned} u_{Sq} &= R_S i_{Sq} + (L_{\sigma S} + K_R L_{\sigma R}) \frac{di_{Sq}}{dt} + e_{Sq}; \\ -K_S u_{Sq} &= R_R i_{Rq} + (L_{\sigma R} + K_S L_{\sigma S}) \frac{di_{Rq}}{dt} - e_{Rq}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $L_{\sigma S}$, $L_{\sigma R}$ – индуктивности от полей рассеяния обмоток статора и ротора; K_S – коэффициент связи статора; $K_S = L_m/L_S$, e_{Sq} – мгновенное значение фазной э.д.с. статора,

$$e_{Sq} = K_R e_{bq} - K_R R_R i_{Rq};$$

e_{Rq} – мгновенное значение фазной э.д.с. ротора

$$e_{Rq} = e_{bq} - K_S R_S i_{Sq}.$$

Анализ полученной системы дифференциальных уравнений (4) показывает, что уравнениям цепи статора может быть поставлена в соответствие трехфазная схема замещения статора АМ. Эта схема включает три ветви, соединенные в звезду. Каждая ветвь состоит из последовательно включенных активного сопротивления обмотки фазы статора R_S , ее эквивалентной индук-

тивности $L_{S3} = L_{6S} + K_R L_{6R}$ и фазной э.д.с. e_{Sq} . Наличие такой схемы замещения позволяет производить расчет напряжения в нагрузке системы "Ц-АМ" методами расчета электрических цепей [2]. Кроме упрощения количественного анализа, схема замещения дает наглядное объяснение некоторым явлениям при тиристорном управлении АМ. В частности э. д. с. e_{Sq} включает в себя не только э.д.с. вращения e_{bq} , возникающую от действия токов при вращении ротора АМ, но и э.д.с. взаимоиנדукции e_{RSq} , которая наводится и при неподвижном роторе. Данная схема замещения справедлива как в установившихся, так и в переходных процессах при любой асимметрии и форме питающего напряжения. В установившемся режиме работы и симметрии трехфазных выходных напряжений циклоконвертора уравнения (4) позволяют получить эквивалентную однофазную схему замещения АМ. При определенных допущениях однофазная схема замещения АМ является удобной основой для аналитического исследования системы "Ц-АМ" [3].

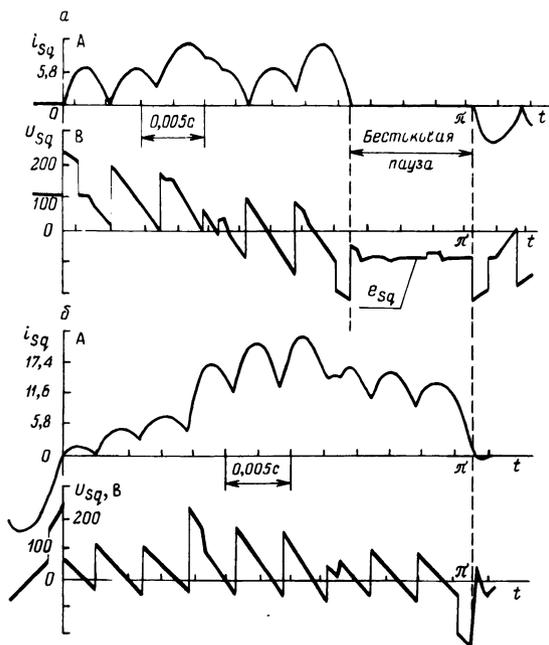


Рис. 1. Осциллограммы кривых фазных токов и напряжений АМ при холостом ходе (а) и коротком замыкании (б).

На рис. 1 приведены осциллограммы кривых фазных токов и напряжений АМ типа А02 41-4, 4 кВт, 1450 об/мин при питании ее напряжением с частотой $16 \frac{2}{3}$ Гц от трехфазно-трехфазного трехпульсного лучевого циклоконвертора на 18 тиристорах, работающего с постоянным углом управления $\alpha_1 = 70^\circ$. Причем, рис. 1, а соответствует режиму холостого хода АМ ($n_R = 500$ об/мин), а рис. 1, б — режиму короткого замыкания ($n_R = 0$).

Приведенные осциллограммы показывают существенное влияние э.д.с., АМ на выходные напряжения и ток циклоконвертора и служат подтверждением необходимости прямого учета фазной э.д.с. статора АМ.

Поэтому систему уравнений (4), которая адекватно отражает физические процессы в реальной электрической асинхронной машине, управляемой от циклоконвертора, наиболее целесообразно использовать в качестве основы при математическом моделировании комплекса "Ц—АМ".

Таким образом, предложена и обоснована рациональная форма записи дифференциальных уравнений трехфазной асинхронной электрической машины, позволяющая обеспечить моделирование на ЦВМ процессов при частотном управлении асинхронной машиной от тиристорного циклоконвертора с естественной коммутацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. К о п ы л о в И.П., Щ е д р и н О.П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин. — М.: Энергия, 1973. — 120 с.
2. Ф и р а г о Б.И., С и д о р о в В.Г. Определение напряжения на нагрузке системы "тиристорный циклоконвертор — асинхронный двигатель". — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1982, № 1, с. 33—37.
3. Ф и р а г о Б.И., С и д о р о в В.Г. Анализ квазистационарных электромагнитных процессов в асинхронном двигателе, питаемом от тиристорного циклоконвертора. — *Elektrotechnicky Casopis*, 32, 1981, с. 3, с. 186—200.

УДК 621.317.1

Г.А. БАХАНОВИЧ, инженер (ММИ)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО УГЛА СИНХРОННЫХ МАШИН

Большинство существующих схем измерительных устройств внутреннего угла θ синхронных машин выполнены по электромагнитной системе [1—3], обладающей инерционностью, погрешностью в динамических режимах, сложностью настройки и эксплуатации, что затрудняет их применение для быстроходных синхронных электроприводов малой мощности.

Более совершенным является устройство, предложенное в [4], где фиксация оси поля ротора осуществляется с помощью бесконтактной безынерционной фотосистемы. Вместе с тем это устройство является достаточно сложным из-за необходимости дополнительной коммутации и, кроме того, вносит заметное запаздывание, так как измерение выходного напряжения, пропорционального углу θ , производится один раз за период напряжения сети.

Предъявляемые к измерительным устройствам угла θ требования высокой точности, быстродействия, стабильности измерения как в установившемся, так и в динамическом режимах, простоты и надежности в эксплуатации могут быть в определенной мере обеспечены применением измерительного преобразователя внутреннего угла синхронных машин, принципиальная схема которого показана на рис. 1.

Применение датчика, фиксирующего положение ротора синхронной ма-