

ВЫВОД

Опыт эксплуатации программ NEWLF и INPTC и результаты выполненного анализа их эффективности с учетом специфики советских энергосистем и применяемых ЭВМ третьего поколения могут быть использованы для улучшения характеристик отечественных программ расчета установившихся режимов энергосистем большой размерности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mascheroni M., Nevaloro S. Il programma NEWLF per calcoli di load-flow in reti di grandi dimensioni. Riporto CRA ENEL, RI/38-4, sept., 1974.
2. Innorta M., Marappino P., Mocenigo M. Active and reactive power scheduling with security and voltage constraints. PSCC. Cambridge, sept., 1975.
3. Brameller A., Allan R. N., Hamam Y. M. Sparsity its practical application to systems analysis, London, 1976, p. 190.

Представлена кафедрой
электрических станций, сетей и систем

[29.10.1980]

УДК 621.34

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА АВМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ОДНОВРЕМЕННОЙ НЕСИММЕТРИЕЙ СТАТОРНОЙ И РОТОРНОЙ ЦЕПЕЙ

Канд. техн. наук А. Е. МАЛИНОВСКИЙ

Гомельский политехнический институт

Широкое использование асинхронного электропривода в промышленности вызвало необходимость исследования целого ряда режимов работы асинхронных двигателей, в том числе и несимметричных.

Известно [1—3], что несимметрия режимов работы приводит к характерным особенностям в протекании переходных процессов в асинхронных двигателях, оказывает неблагоприятное влияние на электрические сети и системы и требует детального рассмотрения.

Обычно при математическом описании несимметричных режимов работы асинхронных двигателей пользуются приведенными к каким-либо координатным осям уравнениями; при несимметрии статорной цепи — к осям α , β , 0, роторной — к осям d , q , 0. Это позволяет существенно упростить математическое описание процессов, протекающих в двигателе, избавиться от периодических коэффициентов в уравнениях, а также провести решение с помощью математического моделирования на АВМ.

При одновременной несимметрии роторной и статорной цепей пользуются непреобразованной системой уравнений с периодическими коэффициентами, записанной в реальных статорных и роторных осях [3], так как обычный подход к преобразованию уравнений двигателя с несимметрией обеих цепей не избавляет от периодических коэффициентов, уравнения получаются громоздкими, и решение их возможно лишь с помощью ЦВМ. Это обусловлено тем, что математическая модель, реали-

зованная на АВМ, требует применения большого числа блоков перемножения и главное практически не реализуема из-за структурной неустойчивости [6].

Настоящая работа посвящена преобразованию уравнений асинхронного двигателя с одновременной несимметрией статорной и роторной цепей, позволяющему получить систему уравнений, не содержащую периодических коэффициентов, и на ее основе создать математическую модель несимметричного двигателя, реализуемую с помощью АВМ.

Рассмотрим обобщенную двухфазную асинхронную машину, содержащую систему несимметричных обмоток; статорную, характеризуемую параметрами по осям α , β , и роторную — по осям d , q [1, 3].

r_α , x_α — активное и индуктивное сопротивления статорной обмотки, расположенной по оси α ;

r_β , x_β — то же, по оси β ;

r_d , x_d , r_q , x_q — соответствующие сопротивления роторных обмоток;

x_m — сопротивление взаимной индукции.

Если принять оси α и d за действительные, а β и q — за мнимые, то система уравнений, записанная в комплексных мгновенных значениях переменных величин, в реальных осях координат, имеет следующий вид [1—3]:

$$\begin{aligned} u_\alpha + ju_\beta &= (r_\alpha + px_\alpha)i_\alpha + (r_\beta + px_\beta)ji_\beta + x_m \cos \Theta pi_d + \\ &+ jx_m \sin \Theta pi_d - x_m \sin \Theta pi_q + jx_m \cos \Theta pi_q; \\ 0 &= (r_d + px_d)i_d + (r_q + px_q)ji_q + x_m \cos \Theta pi_\alpha - \\ &- jx_m \sin \Theta pi_\alpha + x_m \sin \Theta pi_\beta + jx_m \cos \Theta pi_\beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_α , i_β , i_d , i_q — токи соответствующих обмоток;

Θ — угол между осями α и d .

В свою очередь мгновенные значения переменных можно представить как действительные и мнимые части вновь введенных комплексных переменных. Соответственно мгновенные значения переменных величин:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= \operatorname{Re}[U_\alpha]; & u_\beta &= \operatorname{Im}[U_\beta]; & i_\alpha &= \operatorname{Re}[I_\alpha]; \\ i_\beta &= \operatorname{Im}[I_\beta]; & i_d &= \operatorname{Re}[I_d]; & i_q &= \operatorname{Im}[I_q]. \end{aligned}$$

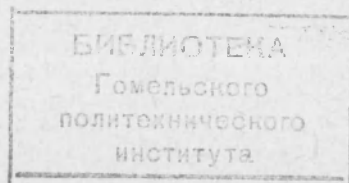
Учитывая, что действительные и мнимые значения комплексного числа $\dot{A} = a + jb$ можно представить в виде суммы и разности с сопряженным

комплексным числом $\hat{A}$

$$a = \operatorname{Re}[\dot{A}] = \frac{1}{2} (\dot{A} + \hat{A}); \quad jb = \operatorname{Im}[\dot{A}] = \frac{1}{2} (\dot{A} - \hat{A}),$$

перепишем систему (1) через полные комплексные значения переменных:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (\dot{U}_\alpha + \hat{\dot{U}}_\alpha) + \frac{1}{2} (\dot{U}_\beta - \hat{\dot{U}}_\beta) &= \frac{1}{2} (r_\alpha + px_\alpha) (\dot{I}_\alpha + \hat{\dot{I}}_\alpha) + \\ &+ \frac{1}{2} (r_\beta + px_\beta) (\dot{I}_\beta - \hat{\dot{I}}_\beta) + \frac{1}{2} px_m [(\dot{I}_d + \hat{\dot{I}}_d) + (\dot{I}_q - \hat{\dot{I}}_q)] e^{j\Theta}; \\ 0 &= \frac{1}{2} (r_d + px_d) (\dot{I}_d + \hat{\dot{I}}_d) + \frac{1}{2} (r_q + px_q) (\dot{I}_q - \hat{\dot{I}}_q) + \\ &+ \frac{1}{2} px_m [(\dot{I}_\alpha + \hat{\dot{I}}_\alpha) + (\dot{I}_\beta - \hat{\dot{I}}_\beta)] e^{-j\Theta}, \end{aligned} \quad (2)$$



где

$$e^{j\Theta} = \cos \Theta + j \sin \Theta.$$

Используя метод суперпозиции, который выполняется для системы уравнений асинхронного двигателя, разрешенной относительно токов [2], представим систему уравнений (2) в виде двух систем, записанных относительно основных и сопряженных комплексных переменных:

$$\begin{aligned} (\dot{U}_\alpha + \dot{U}_\beta) &= (r_\alpha + px_\alpha) \hat{I}_\alpha + (r_\beta + px_\beta) \hat{I}_\beta + px_m (\hat{I}_d + \hat{I}_q) e^{j\Theta}; \\ 0 &= (r_d + px_d) \hat{I}_d + (r_q + px_q) \hat{I}_q + px_m (\hat{I}_\alpha + \hat{I}_\beta) e^{-j\Theta}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (\hat{U}_\alpha - \hat{U}_\beta) &= (r_\alpha + px_\alpha) \hat{I}_\alpha - (r_\beta + px_\beta) \hat{I}_\beta + px_m (\hat{I}_d - \hat{I}_q) e^{j\Theta}; \\ 0 &= (r_d + px_d) \hat{I}_d - (r_q + px_q) \hat{I}_q + px_m (\hat{I}_\alpha - \hat{I}_\beta) e^{-j\Theta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как системы (3) и (4) разрешены относительно комплексных переменных, приведем их к координатным осям x , y , 0 , вращающимся с произвольной скоростью ω_K [7]:

$$\begin{aligned} (U_\alpha + U_\beta) &= [r_\alpha + (p + j\omega_K) x_\alpha] \hat{I}_\alpha + [r_\beta + (p + j\omega_K) x_\beta] \hat{I}_\beta + (p + j\omega_K) x_m (\hat{I}_d + \hat{I}_q); \\ 0 &= \{r_d + [p + j(\omega_K - \omega)] x_d\} \hat{I}_d + \{r_q + [p + j(\omega_K - \omega)] x_q\} \hat{I}_q + [p + j(\omega_K - \omega)] x_m (\hat{I}_\alpha + \hat{I}_\beta); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (\hat{U}_\alpha - \hat{U}_\beta) &= [r_\alpha + (p + j\omega_K) x_\alpha] \hat{I}_\alpha - [r_\beta + (p + j\omega_K) x_\beta] \hat{I}_\beta + (p + j\omega_K) x_m (\hat{I}_d + \hat{I}_q); \\ 0 &= \{r_d + [p + j(\omega_K - \omega)] x_d\} \hat{I}_d - \{r_q + [p + j(\omega_K - \omega)] x_q\} \hat{I}_q + [p + j(\omega_K - \omega)] x_m (\hat{I}_\alpha - \hat{I}_\beta). \end{aligned} \quad (6)$$

Переменные приведенных уравнений систем (5) и (6) разделим на действительные, принадлежащие оси x и мнимые, принадлежащие оси y составляющие. При этом получим систему из восьми уравнений, разрешенную относительно введенных комплексных переменных.

Почленно складывая и вычитая уравнения статорной и роторной цепей, получим окончательную систему уравнений, описывающую процессы в асинхронном двигателе при одновременной несимметрии роторной и статорной цепей, записанной в системе координат x , y , 0 , вращающейся с произвольной скоростью ω_K :

$$\begin{aligned} u_{\alpha x} &= (r_\alpha + px_\alpha) i_{\alpha x} + px_m i_{dx} - \omega_K (x_m i_{qy} + x_\beta i_{\beta y}); \\ u_{\alpha y} &= (r_\alpha + px_\alpha) i_{\alpha y} + px_m i_{dy} + \omega_K (x_m i_{qx} + x_\beta i_{\beta x}); \\ 0 &= (r_d + px_d) i_{dx} + px_m i_{\alpha x} - (\omega_K - \omega) (x_m i_{\beta y} + x_q i_{qy}); \\ 0 &= (r_d + px_d) i_{dy} + px_m i_{\alpha y} + (\omega_K - \omega) (x_m i_{\beta x} + x_q i_{qx}); \\ u_{\beta x} &= (r_\beta + px_\beta) i_{\beta x} + px_m i_{qx} - \omega_K (x_m i_{dy} + x_\alpha i_{\alpha y}); \\ u_{\beta y} &= (r_\beta + px_\beta) i_{\beta y} + px_m i_{qy} + \omega_K (x_m i_{dx} + x_\alpha i_{\alpha x}); \\ 0 &= (r_q + px_q) i_{qx} + px_m i_{\beta x} - (\omega_K - \omega) (x_m i_{\alpha y} + x_d i_{dy}); \\ 0 &= (r_q + px_q) i_{qy} + px_m i_{\beta y} + (\omega_K - \omega) (x_m i_{\alpha x} + x_d i_{dx}). \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно из системы (7), уравнения разбиваются на две группы, описывающие процессы в двигателях с симметричными параметрами об-

моток, соответствующих параметрам по действительным α , d и мнимым β , q осям, но имеющих перекрестные связи. При равенстве параметров обмоток система (7) распадается на две одинаковые, независимые системы уравнений, в которых наличие перекрестных связей не имеет значения в связи с тем, что изменение переменных величин в них одинаково.

Чтобы решить задачу окончательно, необходимо рассмотреть уравнение движения двигателя

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_c. \quad (8)$$

Момент двигателя определится из выражения

$$M_{\text{дв}} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [j (\hat{I}_2 \hat{I}_1) x_m] p, \quad (9)$$

где p — число пар полюсов.

Исходя из ранее рассмотренных соотношений, значения токов равны:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \operatorname{Re}[I_\alpha] = i_{\alpha x}; \quad i_\beta = \operatorname{Im}[I_\beta] = i_{\beta y}; \\ I_1 &= i_\alpha + j i_\beta = i_{\alpha x} + j i_{\beta y}; \\ i_d &= \operatorname{Re}[I_d] = i_{dx}; \quad i_q = \operatorname{Im}[I_q] = i_{qy}; \\ I_2 &= i_d + j i_q = i_{dx} + j i_{qy}. \end{aligned}$$

Подставив значения токов I_2 и I_1 в выражение (9), получим:

$$M_{\text{дв}} = \frac{3}{2} x_m p (i_{\beta y} i_{dx} - i_{\alpha x} i_{qy}). \quad (10)$$

Таким образом, система (7) с уравнениями (8), (10) описывает поведение асинхронного двигателя при совместной несимметрии статорных и роторных цепей и легко может быть решена с помощью аналогового моделирования.

Модель, реализованная на АВМ, представляет собой две обычные модели асинхронных двигателей [3, 4, 5], работающих совместно, но имеющих перекрестные связи.

В ряде случаев для более простого решения и удобства аналогового моделирования целесообразно систему уравнений (7) выразить через потокосцепления двигателей [4, 5].

Кроме того, решение данной системы на ЦВМ в пять раз сокращает затраты машинного времени по сравнению с решением системы уравнений с периодическими коэффициентами.

В заключение можно отметить, что в данном случае для компактности изложения решен частный случай задачи. Рассмотренным методом легко решить задачу при несимметрии взаимоиндуктивности, а также получить уравнение для двигателя с обмотками, расположенными по реальным осям $A, B, C, 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. — М.—Л.: Изд. АН СССР, 1962.
2. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока. — М.—Л.: ГЭИ, 1958.
3. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии. — М.: Энергия, 1973.

4. Электромагнитные переходные процессы в асинхронных двигателях / М. М. Соколов и др.— М.: Энергия, 1967.
5. Копылов И. П., Мамедов Ф. А., Беспалов В. Я. Математическое моделирование асинхронных двигателей.— М.: Энергия, 1969.
6. Моделирование на аналоговых вычислительных машинах / Е. Я. Архангельский и др.— Л.: Энергия, 1972.
7. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока.— М.— Л.: ГЭИ, 1963.

Представлена кафедрой ТОЭ

[26.5.1980]

УДК 621.314.222.6:621.316.925

РАСЧЕТ СКОРОСТИ МАСЛА В ГАЗОВОМ РЕЛЕ ПРИ ВИТКОВОМ ЗАМЫКАНИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Докт. техн. наук, проф. В. Е. ПОЛЯКОВ, кандидаты техн. наук, доценты Г. А. КОМИССАРОВ, Г. А. ЧЕЧУШКОВ, инж. С. А. ПАВЛИКОВ

Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола

Одна из функций газовой защиты — отключение ею защищаемого аппарата при достижении скоростью масла в газовом реле определенной величины. Эта скорость зависит от энергии дуги, возникающей в месте повреждения. Для расчета чувствительности отключающего элемента газового реле необходимо уметь рассчитывать ее при таких повреждениях, когда энергия дуги минимальна. К ним относятся витковые замыкания между параллельными проводами соседних витков.

Мощность электрической дуги, согласно [1],

$$N = E_d i_d l, \quad (1)$$

где $E_d = U_d / l$ — средний градиент напряжения в створе дуги;

i_d — ток дуги;

U_d — напряжение дуги;

l — длина дуги.

Так как обмотки трансформаторов имеют радиальные каналы охлаждения, витковое замыкание наиболее вероятно между витками, расположенными в горизонтальной плоскости. Длина дуги в этом случае может быть определена из следующего соотношения:

$$2h_{и} \leq l \leq 2(h_{в} + h_{и})k_{д},$$

где $h_{и}$ — толщина витковой изоляции;

$h_{в}$ — толщина витка в радиальном направлении;

$k_{д}$ — коэффициент, учитывающий искривление дуги под действием собственного магнитного поля и сил, обусловленных конвекцией.

Для дуги минимальной мощности примем ее длину равной кратчайшему расстоянию между витками, соответствующему удвоенной толщине витковой изоляции.

Величину E_d в соответствии с [2] рекомендуется принимать равной 10 000 В/м, а длину дуги — минимальному расстоянию между электро-