

Величины (25) и (26) характеризуют точность решения нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электрической системы. После проведения четырех итераций при заданной точности $\Delta P_1 = \Delta P_2 = 0,1$ МВт, $\Delta Q = 0,1$ Мвар, получаем следующие значения искомого режимных параметров, приведенных в таблице.

Узел	P_i МВт	Q_i Мвар	V_i , кВ	δ_i , град
Э-0	48,17	79,41	220,0	0
ЭС-1	161,26	89,64	220,0	113
Э-2	232,45	101,23	211,1	116
ЭН	431,68	213,54	204	-12,38

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Хачатрян В. С., Эмелян Э. А. Метод расчета установившегося режима электрических систем // Электричество. — 1987. — № 3 — С. 6—11.
2. Эмелян Э. А. Об одном методе расчета установившегося режима электрической системы // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. — 1988. — № 5. — С. 25—26.
3. Хачатрян В. С., Эмелян Э. А. Метод расчета установившегося режима электрической системы // Изв. вузов. Энергетика. — 1989. — № 5 — С. 12—18.
4. Хачатрян В. С. К вопросу об определении производных от потерь активной и реактивной мощностей по активным мощностям стационарных узлов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1970. № 2 — С. 101—108.

ЭрИИ 6 VI. 1990

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLIV, № 1, 1991, с. 25—30

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.333

И. Г. НИКИЯН

УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ КЛЕТКОЙ РОТОРА

Рассмотрены уравнения асинхронной машины (АМ) с учетом электрической связи между контурами симметричной короткозамкнутой клетки ротора. На их основе выведены уравнения АМ с несимметричной клеткой, которые реализуются в ВМ. Проводится сравнение результатов расчета и измерений.

Ил. 1. Библиогр. 5 назв.

Հանրագրված է արհեստական ճիշտությամբ (ՄՊ) համապարտումները, որոնցում հաշվի են առնվում միմյանից փոխկապակցված համաչափ անհամաչափ կարճափակված կլետի միջև առկա էլեկտրապայման կապերը և որոնցից հանդիսանում են ՎՄ-ի մոդելի ստանդարտիզացիայի համապատասխանումները, որոնք իրականացվում են ՎՄ-ի մոդելի համապատասխան արհեստական ճիշտությամբ ճշգրտումների համաձայնումով:

Несимметрия роторной цепи может быть заложена в машину при проектировании, но она может возникнуть также и в производстве и эксплуатации из-за повреждений элементов короткозамкнутой клетки. Принятая в [1, 2] запись уравнений в осях d и q обладает определенными неудобствами при практических расчетах. В настоящей статье приводятся уравнения, записанные в форме, не зависящей от ориентации осей относительно ротора. Рассмотрим асинхронную машину с симметричной короткозамкнутой клеткой на роторе. Принимаем допущения, обычные для теории асинхронных машин. Дифференциальные уравнения напряжений обмоток статора и ротора в неподвижных осях согласно [3] в матричной форме могут быть записаны в следующем виде:

$$\{u_s\} = \{R_s\} \cdot \{i_s\} + \frac{d}{dt} \{\Psi_n\}, \quad (1)$$

где матрицы напряжений и токов имеют форму столбцов, а матрица сопротивлений является диагональной. Матрица потокосцеплений равна

$$\{\Psi_n\} = \{L_n\} \cdot \{i_n\}, \quad (2)$$

где матрица $\{L_n\}$ квадратная, состоящая из индуктивностей и взаимоиндуктивностей. Общее число уравнений напряжения будет равно $(m_1 + m_2)$, где $m_1 = 3$ — число фаз статора, m_2 — число фаз ротора. Благодаря симметрии фазных обмоток статора вместо трех фаз можно рассматривать только одну с учетом полей взаимоиндукции с другими фазами, при этом число уравнений становится равным $(1 + m_2)$.

Активные сопротивления фазы статора и контуров ротора, амплитуды взаимных индуктивностей и индуктивности рассеяния, входящие в уравнения (1) и (2), определяются по формулам, приведенным в [3, 4]. Однако взамен постоянного коэффициента насыщения k_s магнитной цепи, в эти формулы введем переменную величину, зависящую от скольжения

$$k_s(s) = k_{s0} + (1 - k_{s0})s, \quad (3)$$

где k_{s0} — коэффициент насыщения при синхронном вращении ротора, когда скольжение $s = 0$.

Матричное уравнение (1) записано в неподвижных осях координат и поэтому имеет периодические коэффициенты. Чтобы получить уравнения с постоянными коэффициентами, запишем их в системе осей, вращающихся с синхронной скоростью. Согласно [3] для установившегося режима работы машины из (1) получаем уравнения в комплексной форме для статора и n -го контура ротора

$$\dot{U}_s = Z_{s1} I_s + Z_{s2} I_1 + \dots + Z_{sn} I_n + \dots + Z_{sm} I_m, \quad (4)$$

$$0 = Z_{n1} I_s + Z_{n2} I_1 + \dots + Z_{nn} I_n + \dots + Z_{nm} I_m, \quad (5)$$

где I_s — ток фазы статора, а $I_1, \dots, I_n, \dots, I_m$ — токи контуров беличьей клетки ротора.

Полное сопротивление фазы статора при разомкнутых контурах ротора равно

$$Z_{st} = R_s + j(X_m + X_1), \quad (6)$$

где R_s — активное сопротивление фазы, X_m — индуктивное сопротивление, обусловленное полями взаимной индукции фазы с контуром ротора по [3], X_1 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора по [3].

Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в контурах ротора ЭДС, которые имеют одинаковую амплитуду, но сдвинуты по фазе на угол α , равный пространственному углу между контурами ротора. Сопротивления взаимной индукции между контурами ротора и фазой статора будут иметь следующий вид:

$$\text{для 1-го контура ротора} \quad Z_{1s} = j\omega \lambda_m k k_{1s} e^{j\alpha}, \quad (7)$$

$$\text{для } n\text{-го контура ротора} \quad Z_{ns} = j\omega \lambda_m k k_{ns} e^{j(n-1)\alpha}. \quad (8)$$

Для ротора отсчет углов от осей его контуров по отношению к оси фазы (А) статора ведется в обратном направлении. Сопротивления взаимной индукции между фазой статора и контурами ротора определяются по формулам

$$\text{для 1-го контура ротора} \quad Z_{s1} = -j\omega \lambda_m k k_{s1} e^{-j\alpha}, \quad (9)$$

$$\text{для } n\text{-го контура ротора} \quad Z_{sn} = -j\omega \lambda_m k k_{sn} e^{-j(n-1)\alpha}, \quad (10)$$

где k_{ns} — коэффициент связи назван [4].

Коэффициент трансформации ЭДС между контуром ротора и фазой статора в комплексной форме имеет вид:

$$K = Ke^{-j\frac{1}{2}(n-1)\alpha}, \quad \dot{K} = Ke^{j\frac{1}{2}(n-1)\alpha}, \quad K = \sin \alpha \cdot 2 W_s k_{ns},$$

где W_s и k_{ns} — число витков и обмоточный коэффициент фазы статора.

Если электрический угол $\alpha < 20^\circ$, то $e^{\pm j\frac{1}{2}\alpha} \approx 1$ и после преобразований выражения (7)–(10) принимают вид [5]. Полное сопротивление n -го контура ротора Z_{nn} , его взаимное сопротивление с $(n-1)$ -контуром $Z_{n(n-1)}$ и i -ым контуром Z_{ni} (где $i \neq n, n-1$) определяются согласно [5].

Рассмотрим теперь асинхронную машину с несимметричной короткозамкнутой клеткой на роторе. Обычно принимают, что дефект стержня обусловлен увеличением его активного сопротивления, а индуктивное сопротивление считают неизменным. Активное сопротивление n -го дефектного стержня представим как сумму активного сопротивления R_{sn} стержня при отсутствии дефекта и добавочного сопротивления ΔR_{sn} .

Несимметричная многофазная система токов ротора разлагается на симметричные составляющие прямой, обратной и промежуточных последовательностей. Проведенные расчеты показывают, что токи статора, обусловленные токами промежуточных последовательностей ротора, пренебрежимо малы, поэтому можно допустить, что в статоре существуют токи основной частоты f и $f_{0s} = (i-2s)f$, обусловленные токами обратной последовательности ротора. Принимаем, что ток частоты f_{0s} существует в отдельном, независимом контуре статора, который не имеет электромагнитной и электрической связи с контуром тока частоты f , но связан электромагнитно с контурами ротора. Можно принять также, что самоиндуктивность этого контура и его взаимоиндуктивности с контурами ротора остаются такими же, как и для контура основной частоты. Будем учитывать, что для обратного поля направление обхода контуров ротора изменяется на обратное, а в формулах типа (7)–(10) применительно к контуру токов частоты f_{0s} комплексный коэффициент трансформации K заменяется на сопряженный K^* и наоборот. Напряжение на зажимах контура тока частоты f_{0s} уравнивается падением напряжения во внешней цепи. Оно обычно невелико и может быть принято равным нулю. Поле ротора, созданное токами ротора обратной последовательности, перемещается относительно статора в обратном направлении при $s > 0,5$. Будем считать, что частота тока статора при этом является положительной и равной $(2s-1)f$.

Уравнения напряжений контура частоты f_{0s} и n -го контура ротора с учетом их взаимной связи будут иметь следующий вид:

$$0 = Z_{20s} I_{0s} + Z_{001} I_1 + \dots + Z_{0n} I_n + \dots - Z_{0m} I_m, \quad (11)$$

$$0 = Z_{ns} I_s + Z_{n0s} I_{0s} + Z_{nn} I_n + \dots + Z_{nk} I_k + \dots + Z_{nm} I_m, \quad (12)$$

Здесь

$$Z_{20s} = R_s + j(2s-1)(X_m + X_s),$$

$$Z_{0nk} = j \frac{1}{m_1} (2s-1) X_{rn} K k_{rk} e^{-j\alpha_n}, \quad Z_{n0s} = jk X_n K^* k_{rk} e^{j\alpha_n}$$

При несимметрии роторной цепи уравнение напряжений статора (4) для токов основной частоты остается без изменения. Записав уравнения (4), (11) и (12) для всех контуров ротора, получим полную систему $(2+m_2)$ уравнений асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой. При этом в выражения для сопротивлений $Z_{2,n-1}$, Z_{nn} и $Z_{n,n-1}$, соответствующие дефектным стержням, должны быть введены добавочные активные сопротивления ΔR_n .

Решение системы уравнений было выполнено на ЭВМ методом исключения (Гаусса) для экспериментального двигателя на базе АОЛ22-2 (габаритная мощность 600 Вт, 380/220 В, 2800 об/мин). Клетка ротора состояла из 18 мелких стержней и латунных колец, напильникованных от сердечника ротора. Сопротивления нормального

стержня: активное— $1,736 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}$, индуктивное— $1,77 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}$, сегмента кольца: активное— $1,618 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, индуктивное— $1,252 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$, а индуктивное сопротивление взаимной индукции $X_m = 422 \text{ Ом}$. Расчеты и эксперименты проводились при линейном напряжении 240 В и симметрии короткозамкнутой клетки, а также для случаев обрыва стержней от 3 до 7, расположенных рядом друг с другом. В расчетах приняты скольжения от 1 до 0. Как видно (рис.), расчетные значения ничем не отличаются от измеренных (рис.), что подтверждает правильность примененного подхода и приемлемость допущений.

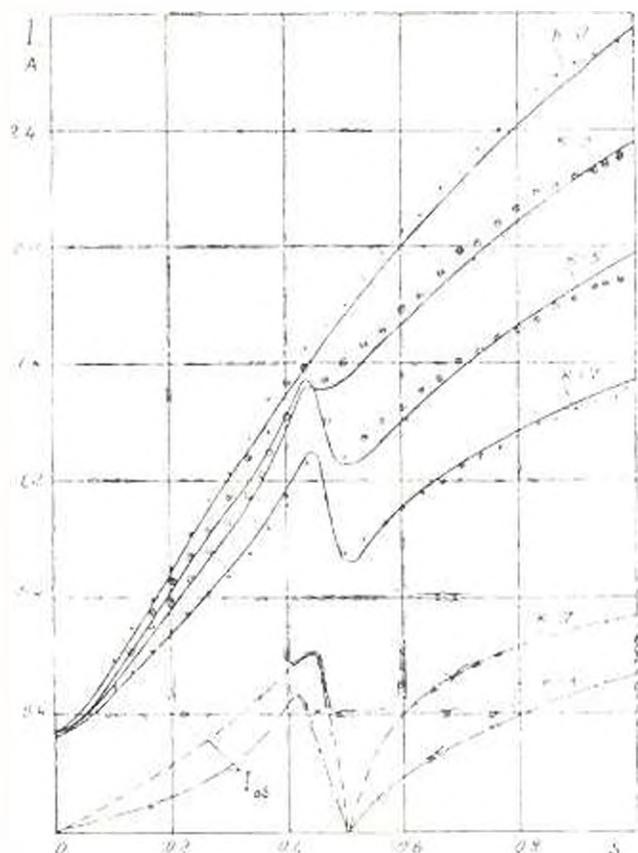


Рис. Зависимость полного тока и тока частоты f_m статора от скольжения при разных числах оборванных стержней k ротора с изолированной клеткой. Опытные данные: \times — $k = 0$, \circ — $k = 3$, \triangle — $k = 5$, \square — $k = 7$, — — — расчет.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Копылов И. И. Электромеханические преобразователи энергии — М. Энергия, 1973. — 400 с.

