

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Розаев И.А.

Научный руководитель: Однокопылов Г.И., к.т.н., доцент

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: RozayevIA@gmail.com

В условиях развития промышленных систем и систем с повышенными требованиями к надежности и отказоустойчивости исполнительных механизмов появляется необходимость разработки математической модели вентильно-индукторного электродвигателя в аварийных неполнофазных режимах работы.

В основу математической модели вентильно-индукторного двигателя положены уравнения электрических контуров составленные для каждой из фаз. Приняты допущения, что магнитные системы каждой фазы идентичны друг другу, гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе не учитываются, а активные сопротивления фаз равны [1,2]. В этом случае фаза ВИД описывается уравнением электромагнитного равновесия, согласно второму закону Кирхгофа. Уравнение электрического равновесия двигателя:

$$U_x = R_s i_x + \frac{d\psi(\theta_{ex}, i_x)}{dt},$$

где U_x – напряжение приложенное к обмотке фазы с индексом x ;

i_x – фазный ток;

R_s – электрическое сопротивление фазы;

$\psi(i_x, \theta_{ex}) = L_x(i_x, \theta_{ex}) \cdot i_x$ – потокосцепление фазы.

Известно, что индуктивность обмоток в вентильно-индукторном электродвигателе представляется нелинейной зависимостью текущего положения ротора и значения фазного тока, которая может быть представлена как:

$$L(i, \theta_e) = L_0(i) + L_1(i) \cdot \cos \theta_e + L_2(i) \cdot \cos 2\theta_e, \text{ где}$$

$\theta_e = N_r \theta_r$ – электрический угол ротора в радианах;

N_r – число полюсов ротора;

θ_r – механический угол положения ротора в радианах;

$L_0(i)$, $L_1(i)$, $L_2(i)$ – функции зависимостей индуктивности от тока основанные на трех основных положениях ротора в пространстве магнитного поля (по закону Фарадея об ориентации ферромагнитных материалов в пространстве магнитного поля)[3, 4].

Преобразуем уравнения электрического равновесия двигателя:

$$U_x = R_s i_x + \frac{d\{L_x(i_x, \theta_e) i_x\}}{dt} =$$

$$R_s i_x + L_x(i_x, \theta_e) \frac{di_x}{dt} + i_x \frac{d\theta_{ex} \cdot dL_x(i_x, \theta_e)}{dt \cdot d\theta_e} = \omega$$

$$R_s i_x + L_x(i_x, \theta_e) \frac{di_x}{dt} + \frac{dL_x(i_x, \theta_e)}{d\theta_e} \cdot \omega \cdot i_x, \text{ где}$$

ω – угловая частота вращения ротора;

В данном уравнении в правой части представлены слагаемые показывающие потери напряжения на активном и реактивном сопротивлении и возникающая в системе противо-ЭДС, которая может быть выражена как:

$$e = \frac{dL_x(i_x, \theta_e)}{d\theta_e} \cdot \omega \cdot i_x = K_{bx} \cdot \omega \cdot i_x, \text{ где}$$

$$L_{dx} = \frac{di_x}{dt} \text{ - дифференциальная индуктивность;}$$

$$K_{ex} = \frac{d\Psi_x}{d\theta_e} \text{ - коэффициент противо-эдс;}$$

Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора записывается как [3]:

$$\Delta W_x = M_x \cdot \Delta \theta_r, \text{ где}$$

M_x – электромагнитный момент двигателя формируемый одной фазой;

W_x – механическая энергия.

Отсюда: $M_x = \frac{\Delta W_x}{\Delta \theta_r}$, с учетом принятых

допущений принимаем момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту, тогда изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии $\Delta W'_f$ [5].

$$W'_f = \frac{1}{2} L_x(i_x, \theta_r).$$

$$\text{Отсюда: } M_x = \frac{\Delta M_x}{\Delta \theta_r} = \frac{\Delta W'_f}{\Delta \theta_r} = \frac{\partial L_x(i_x, \theta_r)}{\partial \theta_r} \cdot i_x^2.$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями.

$$\text{Поэтому: } M_{\text{об}} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \theta_r), \text{ где}$$

$M_x(i_x, \theta_r)$ – момент, развиваемый фазой с индексом x ; m – число фаз двигателя.

Для описания вращательного движения ротора представим механическую часть в виде одномассовой системы [2]. Тогда уравнения движения будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{об}} - M_c; \\ \omega = \frac{d\theta_r}{dt}, \end{array} \right. , \text{ где } J - \text{ приведенный}$$

момент инерции ротора; ω - угловая частота вращения ротора;

Таким образом, математическая модель одной секции трехфазного вентильно-индукторного двигателя имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{L_{dA}} \cdot (U_A - R_s i_A - K_{bA} \cdot \omega \cdot i_A); \\ L_{dA} = L_{dA}(i_A, \theta_e); \\ K_{bA} = K_{bA}(i_A, \theta_e); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_{dB}} \cdot (U_B - R_s i_B - K_{bB} \cdot \omega \cdot i_B); \\ L_{dB} = L_{dB}(i_B, \theta_e); \\ K_{bB} = K_{bB}(i_B, \theta_e); \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{L_{dC}} \cdot (U_C - R_s i_C - K_{bC} \cdot \omega \cdot i_C); \\ L_{dC} = L_{dC}(i_C, \theta_e); \\ K_{bC} = K_{bC}(i_C, \theta_e); \\ \omega = \frac{d\theta_r}{dt}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{об}} - M_c, \end{array} \right.$$

Для нормально рабочего состояния:

$$i_{xn} = \begin{bmatrix} i_{1A} & 0 & 0 \\ 0 & i_{1B} & 0 \\ 0 & 0 & i_{1C} \\ i_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & i_{2B} & 0 \\ 0 & 0 & i_{2C} \end{bmatrix}; U_{xn} = \begin{bmatrix} U_{1A} & 0 & 0 \\ 0 & U_{1B} & 0 \\ 0 & 0 & U_{1C} \\ U_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & U_{2B} & 0 \\ 0 & 0 & U_{2C} \end{bmatrix};$$

$$L(i_{xn}, \theta_e) = \begin{bmatrix} L_{1A}(i_{1A}, \theta_e) & 0 & 0 \\ 0 & L_{1B}(i_{1B}, \theta_e) & 0 \\ 0 & 0 & L_{1C}(i_{1C}, \theta_e) \\ L_{2A}(i_{2A}, \theta_e) & 0 & 0 \\ 0 & L_{2B}(i_{2B}, \theta_e) & 0 \\ 0 & 0 & L_{2C}(i_{2C}, \theta_e) \end{bmatrix};$$

$$M_{xn} = \begin{bmatrix} M_{1A}(i_{1A}, \theta_r) & 0 & 0 \\ 0 & M_{1B}(i_{1B}, \theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & M_{1C}(i_{1C}, \theta_r) \\ M_{2A}(i_{2A}, \theta_r) & 0 & 0 \\ 0 & M_{2B}(i_{2B}, \theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & M_{2C}(i_{2C}, \theta_r) \end{bmatrix};$$

$$M_{\text{об}} = M_A + M_B + M_C$$

Соответственно при отказе в одной из фаз на основании диагностики системы возможно формирование подобных матриц отказов, с помощью которых возможно осуществлять отказоустойчивое управление системой электропривода при условии заложенного в систему управления алгоритма отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электродвигателем в аварийных режимах работы.

Вывод:

Разработана математическая модель многосекционного вентильно-индукторного электродвигателя, с матрицей состояния, позволяющая исследовать работу электропривода в аварийных, неполнофазных режимах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Розаев И.А, Однокопылов Г.И, «Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы» // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 138-143
2. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. «Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLabSimulink». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.
3. K.I. Hwu. Applying POWERSYS and SIMULINK to modeling Switched reluctance motor/ Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 429-438 (2009).
4. JIn-Woo Ahn. Switched Reluctance Motor, Torque Control, Prof. Moulay Tahar Lamchich (Ed.). 292 pages. Kyungung University, Korea 2011.
5. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2001.