

УДК 621.313.323

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ НА ВЫПРЯМИТЕЛЬ С АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

*Низимов В.Б., д.т.н., проф., Сторожко В.С., ассистент
Днепродзержинский государственный технический университет
51918, Днепродзержинск, ул. Днепростроевская, 2
E-mail: venom@dstu.dp.ua*

Наведена математична модель синхронної машини при роботі на випрямляч з активно-індуктивним навантаженням.

Ключові слова: математична модель, синхронна машина, випрямляч.

The mathematical model of the synchronous machine at operation for the rectifier with active-inductive loading is resulted.

Key words: mathematical model, the synchronous machine, the rectifier.

Введение. В современной промышленности заметна тенденция к расширению областей применения синхронных машин, как для привода различных механизмов технологических процессов, так и для выработки электрической энергии в промышленных масштабах.

Для ограничения токовых, термических и электродинамических нагрузок предложены системы облегченного пуска (ТПЧ-СД, НПЧ-СД, ТРН-СД) [1], в состав которых входят вентильные преобразователи различных модификаций.

Для повышения быстродействия режимов форсировки возбуждения синхронных генераторов электрических станций нашли применение независимые тиристорные и бесщеточные диодные системы возбуждения.

Для исследования переходных и установившихся процессов электромеханических комплексов, содержащих синхронную машину и вентильные преобразователи, целесообразно выполнить математическое описание в системе фазных координат, которая наиболее приближена к реальным физическим процессам.

В связи с тем, что дифференциальные уравнения контуров синхронной машины содержат переменные коэффициенты, которые являются периодическими функциями углов поворота ротора, обычно математическое описание синхронной машины выполняют в ортогональных координатах, жестко связанных с ротором.

Анализ предыдущих исследований. Математическому описанию синхронной машины, как в режиме двигателя, так и в режиме генератора, посвящено значительное число работ [2-7].

В работе [2] представлена математическая модель синхронной машины в фазной системе координат без учета совместной работы с вентильными преобразователями. Математические модели синхронной машины в ортогональных координатах рассмотрены в работах [2, 3]. Указанные модели не позволяют учитывать несимметрию в цепи статора, а также неполнофазное питание машины.

В работе [4] приведена математическая модель синхронного генератора при работе с выпрямительной нагрузкой. Уравнения синхронного генератора представлены в ортогональных координатах. С помощью линейных преобразований находят фазные токи генератора.

Таким образом, математические модели синхронной машины в фазных координатах при наличии вентильных преобразователей в цепи статора практически не освещены в литературных источниках.

Цель работы. Разработка математической модели синхронной машины в режиме генератора при работе на выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой в фазной системе координат.

Материал и результаты исследований. Представление уравнений синхронной машины в фазных координатах обусловлено необходимостью описывать выпрямитель по мгновенным значениям токов и напряжений в естественных координатах. Поэтому представление уравнений синхронного генератора в ортогональных координатах с последующим обратным преобразованием к фазным координатам для связи с уравнениями выпрямителя не имеет преимуществ с уравнениями синхронной машины в естественных координатах.

Расчетная схема синхронной машины в режиме генератора при работе на выпрямитель, с активно-индуктивной нагрузкой, приведена на рис. 1.

Согласно второму закону Кирхгофа фазные напряжения генератора, являющиеся напряжениями на входных зажимах выпрямителя, определяются выражением

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -d\Psi_a / dt - i_a R; \\ u_b &= -d\Psi_b / dt - i_b R; \\ u_c &= -d\Psi_c / dt - i_c R, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c – полные потокосцепления фазных обмоток; R – активное сопротивление фазы обмотки статора.

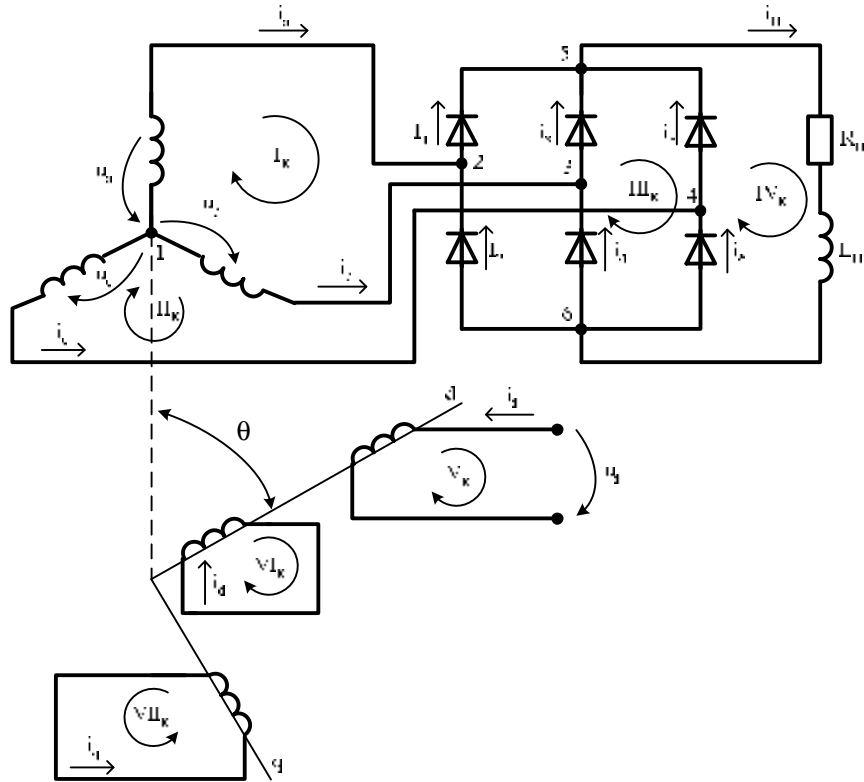


Рисунок 1 – Расчетная схема синхронной машины, работающей на выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой

Уравнения напряжений обмоток ротора:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= -d\Psi_f / dt - i_f R_f; \\ 0 &= -d\Psi_{Дд} / dt - i_{Дд} R_{Дд}; \\ 0 &= -d\Psi_{Дq} / dt - i_{Дq} R_{Дq}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $R_f, R_{Дд}, R_{Дq}$ – активные сопротивления обмоток ротора.

Потокосцепление контуров статора [8] имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_a &= \left[\frac{1}{2}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2\theta \right] i_a - \\ &- \left[\frac{1}{4}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta + \pi/6) \right] i_b - \\ &- \left[\frac{1}{4}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta + 5/6\pi) \right] i_c + \\ &+ M_{af} \cos \theta i_f + M_{aДд} \cos \theta i_{Дд} + M_{aДq} \sin \theta i_{Дq}; \\ \Psi_b &= \left[\frac{1}{2}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta - 2/3\pi) \right] i_b - \\ &- \left[\frac{1}{4}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta + \pi/6) \right] i_a - \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} &- \left[\frac{1}{4}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta - \pi/2) \right] i_c + \\ &+ M_{aДд} (\theta - 2/3\pi) i_{Дд} + M_{aДq} \sin(\theta - 2/3\pi) i_{Дq} + \\ &+ M_{af} (\theta - 2/3\pi) i_f; \\ \Psi_c &= \left[\frac{1}{2}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos(\theta + 2/3\pi) \right] i_c - \\ &- \left[\frac{1}{4}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta + 5/6\pi) \right] i_a - \\ &- \left[\frac{1}{4}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) \cos 2(\theta - \pi/2) \right] i_b + \\ &+ M_{aДд} (\theta + 2/3\pi) i_{Дд} + M_{aДq} \sin(\theta + 2/3\pi) i_{Дq} + \\ &+ M_{af} (\theta + 2/3\pi) i_f, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $L_d = X_d / \omega, L_q = X_q / \omega$ – полные индуктивности фазной обмотки статора (а) при совпадении ее с осями d и q (синхронные индуктивности); $M_{af}, M_{aДд}, M_{aДq}$ – взаимные индуктивности между фазной обмоткой (а) и обмотками возбуждения, продольной и поперечной демпферными при совпадении осей обмоток; $\theta = \theta_0 + \omega t$; θ_0 – начальный угол между осью d и осью фазы a; ω_2 – угловая скорость ротора.

Потокосцепление обмоток ротора:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_f &= M_{af} \cos \theta i_a + M_{af} \cos(\theta - 2/3\pi) i_b + \\ &+ M_{af} \cos(\theta + 2/3\pi) i_c + L_f i_f + M_{aDd} i_{Dd}; \\ \Psi_{Dd} &= M_{aDd} \cos \theta i_a + M_{aDd} \cos(\theta - 2/3\pi) i_b + \\ &+ M_{aDd} \cos(\theta + 2/3\pi) i_c + L_{Dd} i_{Dd} + M_{Ddf} i_f; \\ \Psi_{Dq} &= M_{aDq} \cos \theta i_a + M_{aDq} \sin(\theta - 2/3\pi) i_b + \\ &+ M_{aDq} \sin(\theta + 2/3\pi) i_c + L_{Dq} i_{Dq}, \end{aligned} \right\} (4)$$

где L_b, L_{Dd}, L_{Dq} – полные индуктивности обмоток f, Dd, Dq ; $M_{fDd}=M_{Ddf}$ – взаимная индуктивность между обмотками f и Dd .

Уравнения, описывающие работу синхронной машины в режиме синхронного генератора, работающего на мостовой выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + i_f R_f; 0 = \frac{d}{dt} \Psi_{Dq} + i_{Dq} R_{Dq}; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{Dd} + i_{Dd} R_{Dd}; \\ 0 &= i_1 R_1 - i_3 R_3 + \frac{d\Psi_a}{dt} + i_a R_a - \frac{d\Psi_b}{dt} + i_b R_b; \\ 0 &= -i_4 R_4 + i_6 R_6 + \frac{d\Psi_b}{dt} + i_b R_b - \frac{d\Psi_c}{dt} - i_c R_c; \\ 0 &= i_5 R_5 + i_6 R_6 + i_H R_H + L_H \frac{di_H}{dt}; \\ 0 &= i_3 R_3 - i_5 R_5 - i_6 R_6 + i_4 R_4; 0 = i_1 + i_3 + i_5 - i_H; \\ 0 &= -i_2 - i_4 - i_6 + i_H; \\ 0 &= -i_a - i_6 - i_c; 0 = i_a - i_1 + i_2; 0 = i_b - i_3 + i_4; \\ 0 &= i_c - i_5 + i_6, \end{aligned} \right\} (5)$$

где R_1-R_6 – значения сопротивлений вентилей выпрямителя; R_H, L_H – сопротивление и индуктивность нагрузки соответственно.

Система уравнений (5) дополняется выражениями потокосцеплений контуров синхронной машины из соотношений (3) и (4).

При работе синхронной машины в режиме самовозбуждения в системе уравнений (5) ток i_H заменяется i_f .

Представленная математическая модель синхронной машины позволяет определять токи фаз, вентилей выпрямителя и нагрузки.

Выводы. Разработанная математическая модель синхронной машины в режиме генератора при работе на выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой позволяет исследовать переходные процессы в режимах самовозбуждения, в бесщеточных системах возбуждения с диодными выпрямителями при работе на обмотку возбуждения основного генератора, а также различные виды коротких замыканий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Энергосберегающее оборудование для систем нерегулируемого электропривода / Луговой А.В., Родькин Д.И., Черный А.П., Хайлина С.Г.: Сб. научн. тр. Вып. 1. – Кременчуг: КГПИ. – 1998. – С.15-23.
2. Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазня А.В. Моделирование элементов электромеханических систем. – М.: Энергия, 1971. – 288 с.
3. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
4. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш.шк., 1980. – 176 с.
5. Низимов В.Б., Количев С.В., Низимов Р.В., Сторожко В.С. Синхронная машина в режиме генератора формируемого источника электропитания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчуг: КДПУ, Вып. 3/2006 (38). Частина 2, 2006. – С. 56-58.
6. Низимов В.Б., Количев С.В., Низимов Р.В. Система возбуждения синхронного генератора формируемого источника электропитания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчуг: КДПУ, Вып. 3(32), 2005. – С. 33-35.
7. Низимов В.Б., Низимов Р.В., Сторожко В.С. Математическая модель синхронного двигателя с емкостным накопителем энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. м. Кременчуг, 2003, №2(19). – С. 188-192.
8. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р. Накопители энергии: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

Стаття надійшла 14.04.2007 р.