

Имитационная модель аксиального индукторного генератора с релейным регулятором напряжения

77-48211/631407

09, сентябрь 2013

Трунин Ю. В.

УДК 621.313.323

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

trunin@bmstu.ru

Введение. Аксиальный индукторный генератор (АИГ) можно рассматривать как классический синхронный генератор с явнополюсным пассивным ротором, возбуждение которого осуществляется от независимой аксиальной обмотки. Аксиальная обмотка генератора обычно располагается между пакетами составного статора или рядом, если статор не составной [1].

В отличие от классического синхронного генератора АИГ не имеет на роторе постоянных магнитов или обмотки с контактными кольцами, что, несомненно, является его достоинством. Кроме того, благодаря аксиальной обмотке возбуждения для регулирования выходного напряжения АИГ независимо от частоты вращения ротора можно использовать относительно простой релейный регулятор [2].

В этой статье рассматривается один из вариантов построения имитационной модели такого регулятора для АИГ с выходным напряжением 900 В и мощностью 1100 кВт.

Математическая модель АИГ. В качестве математической модели АИГ для отработки алгоритмов регулирования выходного напряжения достаточно использовать обобщенную модель электрической машины в системе $d - q$ координат [1]. При таком подходе математическое описание АИГ получается таким же, как и у машины постоянного тока.

На рисунке 1 представлена схема замещения АИГ в системе $d-q$ координат. По оси q условно располагается обмотка эквивалентная обмотке якоря машины постоянного тока, а по оси d располагаются две другие обмотки, создающие возбуждение машины. Обмотка с индексом d описывает суммарное эквивалентное подмагничивание, соответствующее подмагничиванию создаваемому фазами статорной обмотки, а обмотка с индексом f является реальной обмоткой возбуждения АИГ, которая располагается на оси d конструктивно.

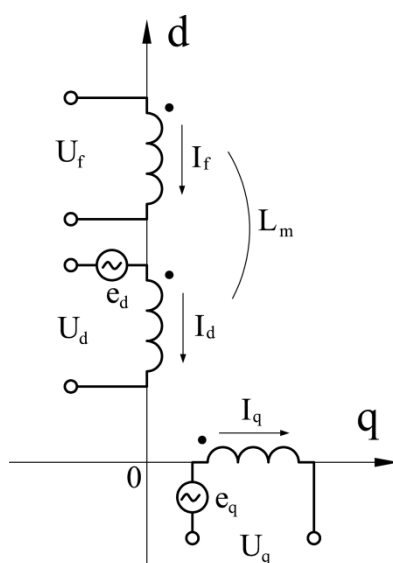


Рисунок 1. Схема замещения АИГ в системе $d-q$ координат

Таким образом, уравнения, описывающие АИГ в системе $d-q$ координат, будут следующие:

уравнения равновесия обмоток

$$\begin{cases} u_d = i_d R_s + \frac{d\psi_d}{dt} - e_q \\ u_q = i_q R_s + \frac{d\psi_q}{dt} + e_d \\ u_f = i_f R_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

где u , i , ψ – мгновенные значения напряжения тока и потокосцепления; R_s – приведенное сопротивление обмоток с индексами d , q ; R_f – сопротивление обмотки возбуждения; e – мгновенное значение ЭДС, наводимой в обмотках,

потокосцепление обмоток

$$\begin{cases} \psi_q = L_q \cdot i_q \\ \psi_d = L_d \cdot i_d + L_m \cdot i_f \\ \psi_f = L_f \cdot i_f + L_m \cdot i_d \end{cases}, \quad (2)$$

где L – индуктивность обмоток; L_m – взаимная индуктивность обмоток с индексами d и f ,

уравнение электромагнитного момента и уравнение динамики

$$\begin{cases} M_e = p_n \cdot (i_q \cdot \psi_d - i_d \cdot \psi_q) \\ M_e = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \end{cases}, \quad (3)$$

где M_e – электромагнитный момент, M_c – момент сопротивления на валу машины, J – приведенный к валу ротора момент инерции, ω – угловая скорость вращения ротора, p_n – число пар полюсов.

В частном случае для трехфазного АИГ преобразование из декартовой системы координат в систему вращающихся $d - q$ координат осуществляются по уравнениям:

прямое преобразование

$$u_d = 2/3[u_a \cdot \cos \beta + u_b \cdot \cos (\beta - 120^\circ) + u_c \cdot \cos (\beta + 120^\circ)] \quad (4)$$

$$u_q = -2/3[u_a \cdot \sin \beta + u_b \cdot \sin (\beta - 120^\circ) + u_c \cdot \sin (\beta + 120^\circ)] \quad (5)$$

обратное преобразование

$$u_a = u_d \cdot \cos \beta - u_q \cdot \sin \beta \quad (6)$$

$$u_b = u_d \cdot \cos (\beta - 120^\circ) - u_q \cdot \sin (\beta - 120^\circ) \quad (7)$$

$$u_c = u_d \cdot \cos (\beta + 120^\circ) - u_q \cdot \sin (\beta + 120^\circ), \quad (8)$$

где u_q, u_d – мгновенные значения напряжений в обмотках по осям d и q , u_a, u_b, u_c – мгновенные значения исходных фазных напряжений в декартовой системе координат, β – мгновенное значение углового положения ротора.

В общем случае для n фазного АИГ уравнения прямого преобразования (4) и (5) приобретают n слагаемых вместо 3-х с соответствующим фазовым сдвигом и коэффициентом $2/n$ вместо $2/3$.

Аналогично при обратном преобразовании вместо трех уравнений (6), (7) и (8) записывается n уравнений для каждой фазной обмотки.

Имитационная модель АИГ с релейным регулятором напряжения. На рисунке 2 представлена имитационная модель 9-ти фазного АИГ с релейным регулятором выходного напряжения, построенная в среде *MATLAB-SIMULINK*. Блок *SRD_N_SI* представляет собой универсальную модель АИГ. Активная нагрузка каждой фазы генератора задается элементом R_n . Форма и амплитуда выпрямленного напряжения рассчитывается блоком *9Phase Bridge*. По выходному сигналу этого блока U_{DC} организуется обратная связь, по которой релейный регулятор в блоке U_f управляет напряжением питания обмотки возбуждения, а, следовательно, и уровнем выходного напряжения АИГ. Частота вращения ротора генератора может задаваться как константа или изменяться во времени, при этом необходимо подать соответствующий сигнал на вход n блока *SRD_N_SI*.

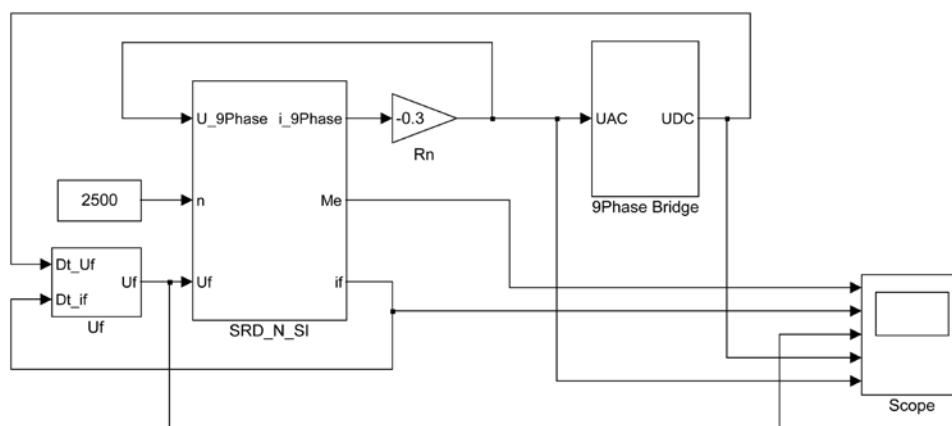


Рисунок 2. Имитационная модель АИГ с релейным регулятором напряжения

Внутреннее содержание блока *SRD_N_SI* раскрывается на рисунке 3. Блок *SRD_N_SI* состоит из блока *Machine_dq*, реализующего уравнения (1) и (2), а также блоков преобразования координат *3abc_dq* и *dq_3abc*, реализующих уравнения (4)...(8) для 9-ти фазного преобразования.

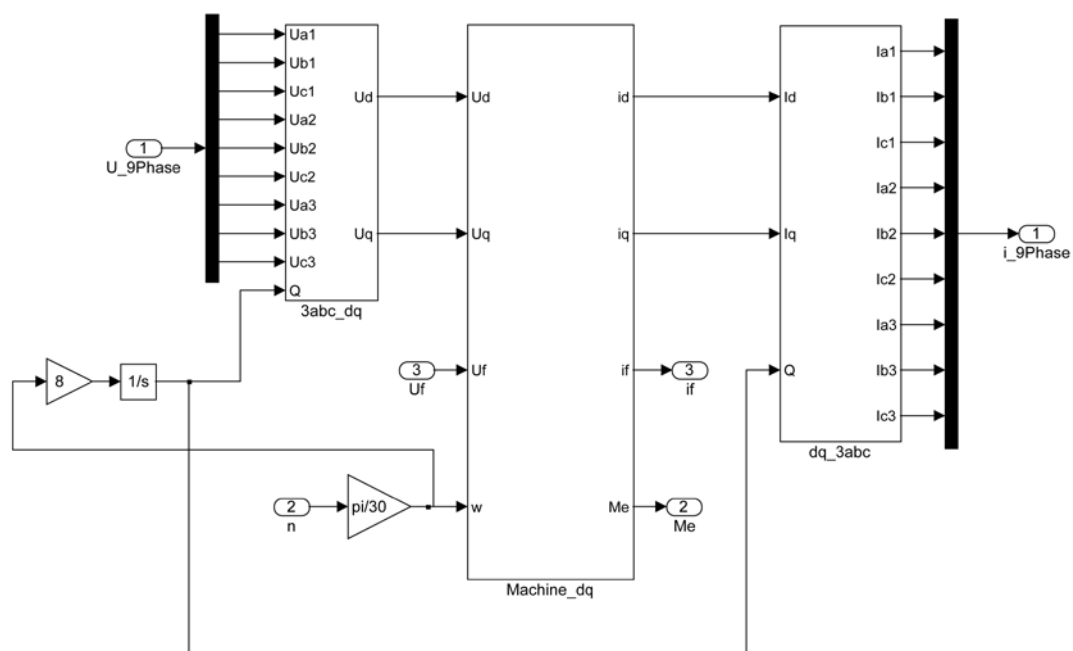


Рисунок 3. Блок *SRD_N_SI*

На рисунке 4 представлена внутренняя структура блока *Machine_dq*, которая реализует традиционный подход к модельному решению системы дифференциальных уравнений (1), совместно с системой уравнений (2) [3-4].

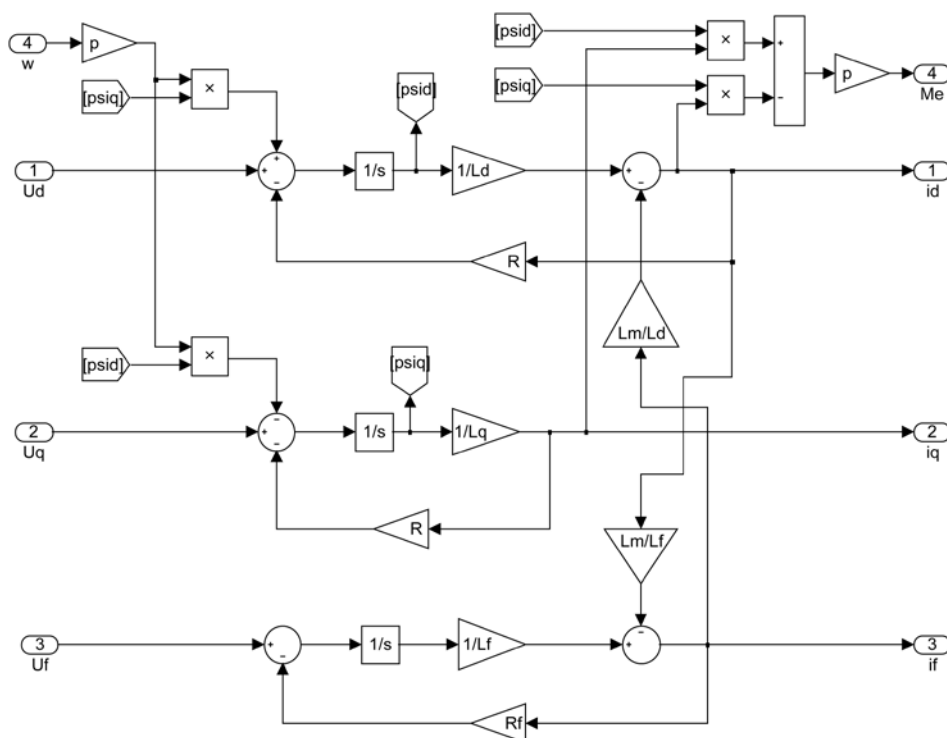


Рисунок 4. Блок *Machine_dq*

На рисунке 5 раскрывается блок U_f , обеспечивающий питание обмотки возбуждения. В этом блоке также моделируется релейное регулирование напряжения обмотки возбуждения. Текущие значения тока возбуждения D_{t_if} и напряжения звена постоянного тока D_{t_Uf} сравниваются на сумматоре с заданными значениями i_{ref} и выходным напряжением АИГ после выпрямителя U_{ref} . Далее в зависимости от результата сравнения обеспечивается релейное переключение напряжения на обмотке возбуждения на 0 В или на 400 В. Объединение каналов регулирования тока обмотки возбуждения и напряжения звена постоянного тока осуществляется при помощи логического сложения AND.

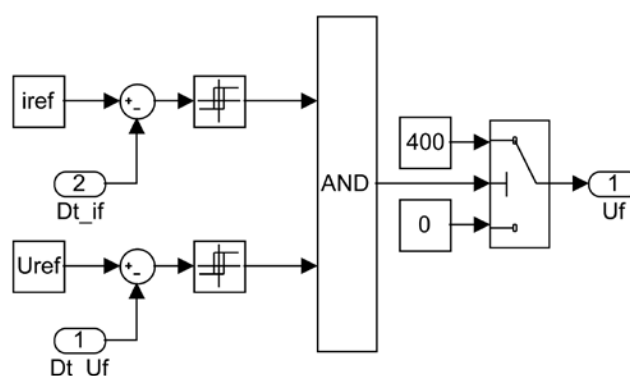


Рисунок 5. Блок U_f

Переменное 9-ти фазное напряжение, вырабатываемое генератором, выпрямляется по схеме «Ларионова» блоком *9Phase Bridge* (рисунок 6). Напряжение 9-ти фаз U_{AC} по общей шине поступает в блок и при помощи стандартной операции модульного преобразования преобразуется в знакопостоянное. Далее каждая из трех групп напряжений согласно схеме «Ларионова» суммируется по максимальному значению при помощи стандартной операции «*max*» и умножается на коэффициент выпрямления. Результирующие напряжения трех групп 9-ти фазного моста также суммируются оператором «*max*», на выходе которого получается выпрямленное напряжение U_{dc} с воспроизведением пульсаций схемы «Ларионова».

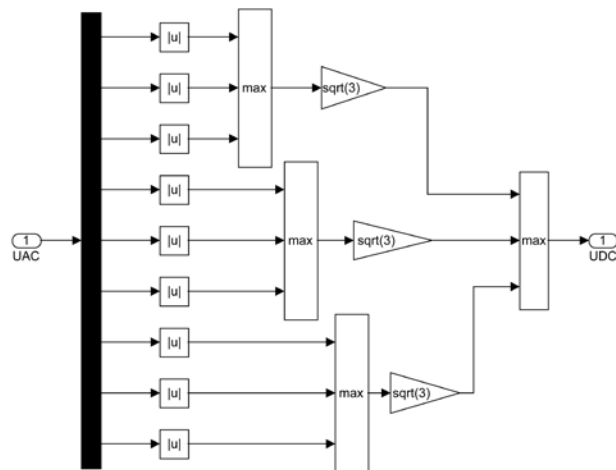


Рисунок 6. Блок *9Phases Bridge*

Результаты моделирования. На рисунке 7 представлены результаты моделирования работы АИГ с выходным напряжением 900 В и мощностью 1100 кВт при активной симметричной нагрузке на фазу равной 50% от номинальной и постоянной частоте вращения ротора равной 2500 об/мин с точностью поддержания выходного напряжения после выпрямителя $U_{DC} \pm 50$ В.

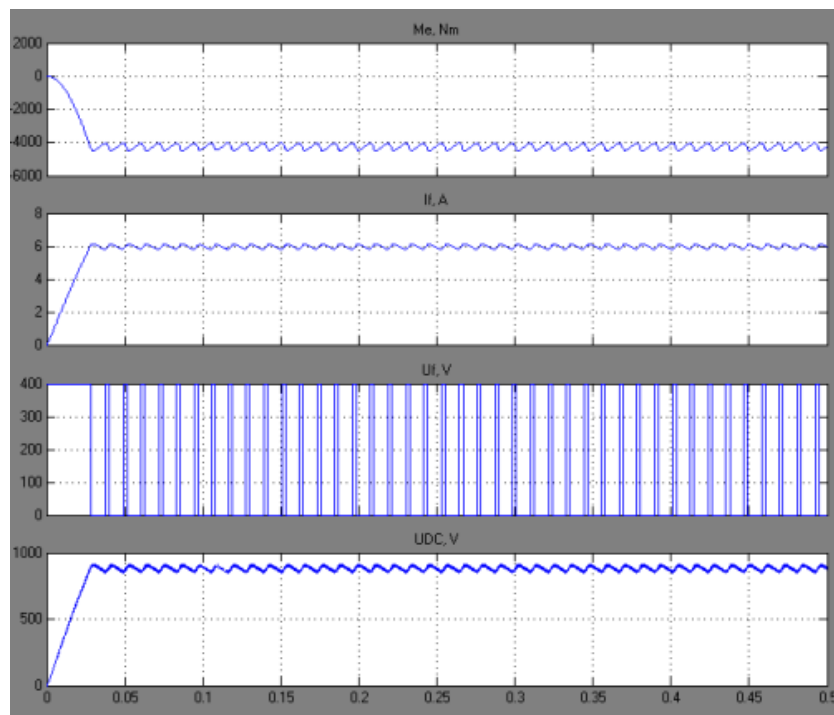


Рисунок 7. АИГ 900 В, 1100 кВт при активной симметричной нагрузке

На рисунке 7 сверху вниз показаны следующие параметры АИГ: M_e – электромагнитный момент развиваемый генератором, I_f – ток в обмотке возбуждения, U_f – напряжение обмотки возбуждения, U_{DC} – напряжение после выпрямителя.

Моделирование показало, что релейный регулятор напряжения возбуждения АИГ позволяет поддерживать заданное выходное напряжение после выпрямителя U_{DC} независимо от нагрузки.

На рисунках 8 и 9 представлены результаты моделирования наиболее показательных, типовых режимов работы АИГ, которые демонстрируют быстроедействие релейного регулятора выходного напряжения АИГ при ступенчатом изменении возмущающих воздействий. На рисунке 8 продемонстрирован сброс активной нагрузки с 50% до 25% от номинальной. Моделирование показало, что отработка такого возмущения длится 0,02с, при этом заброс напряжения после выпрямителя U_{DC} достигает 200В по отношению к заданному напряжению стабилизации. Аналогично на рисунке 9 продемонстрирована отработка ступенчатого изменения частоты вращения ротора АИГ с 2500 до 1900 об/мин. Время отработки возмущения составило 0,02с, падение напряжения после выпрямителя U_{DC} составило 250 В.

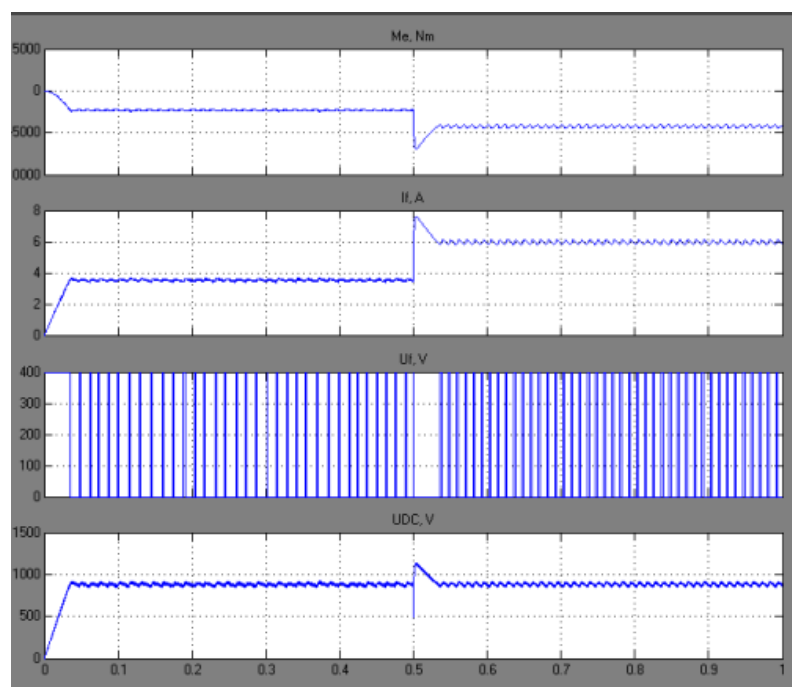


Рисунок 8. Отработка сброса нагрузки АИГ

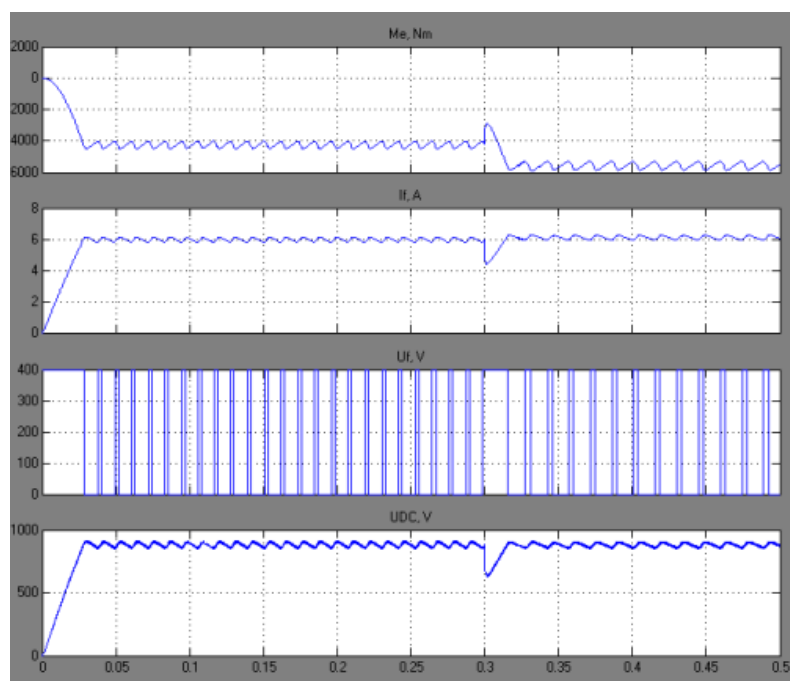


Рисунок 9. Отработка ступенчатого изменения частоты вращения ротора АИГ

В первом и во втором случае установлено, что при ступенчатом изменении нагрузки или частоты вращения ротора АИГ релейный регулятор напряжения возбуждения позволяет поддерживать заданное напряжение после выпрямителя U_{DC} , однако в течение переходного процесса (0,02с) наблюдается значительная просадка или увеличение напряжения на 200...250В.

Список литературы

1. Домбур Л.Э. Аксиальные индукторные машины. – Рига: Зинатне; 1984. 247 с.
2. Козаченко В.Ф. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. № 3. С. 138 – 139.
3. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 2003. № 3. С. 35.
4. Красовский А.Б., Кузнецов С.А., Трунин Ю.В. Моделирование магнитных характеристик вентильно-индукторных машин // Вестник МГТУ. Сер. Естественные науки. – 2007. №4(27). – С. 57 – 77.