

Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора

М.Ю.Медведев, В.А. Шевченко

Надежность энергосистем и качество электрической энергии – одни из самых приоритетных задач энергетики. Удорожание электроэнергии и усложнение структуры энергосети, появление новых элементов, которые могут как потреблять, так и генерировать электричество, приводит к необходимости применения новых энергосберегающих технологий, повышающих эффективность и устойчивость энергосистемы. Эти факторы повышают требования к надежности и требуют исключения возможности возникновения технологических нарушений и аварийных ситуаций, а, следовательно, и уменьшения влияния человеческого фактора при управлении системой.

Одним из основных элементов энергосистемы является синхронный генератор. В связи с этим необходимо решать задачу оптимальной работы генератора и построения автоматической системы управления, исключающей или минимизирующей человеческий фактор при его регулировании.

В процессе работы синхронного генератора могут возникать внешние возмущения или изменение его параметров. Это приводит к ошибке в процессе автоматического регулирования генератора, и как следствие, может привести к аварийному режиму работы энергосистемы. Для предотвращения этой ситуации возникает необходимость подавления возмущений, их учета в процессе автоматического регулирования. Для этого необходимо оценить возмущения, действующие в каждом канале регулятора.

При описании математической модели синхронного генератора используются переменные в системе координат, которая движется вместе с ротором. Переход к движущимся координатам является общепризнанным, для решения задач такого рода и с упрощает математическое описание модели. Так же будем считать, что синхронная машина работает на систему

бесконечной мощности через линию электропередачи, имеющую активное сопротивление r_e и индуктивность L_e , в системе имеется локальная нагрузка, задаваемая активным сопротивлением r_L и индуктивностью L_L .

При общепринятых допущениях о не учете переходных процессов в демпферных обмотках и некоторых других, динамика электромеханических переходных процессов синхронного генератора представляется уравнениями Парка-Горева (в полной модели одномашинной системы). В качестве переменных состояния в этой модели используются токи i_d, i_F, i_q (мгновенные значения), отклонение угла δ и угловая скорость ротора ω . В результате синхронная машина, работающая на систему неограниченной мощности через линию электропередачи, может быть представлена следующими уравнениями [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{L_d}{2\tau_J} i_q i_d - \frac{kM_F}{2\tau_J} i_q i_F + \frac{L_q}{2\tau_J} i_d i_q - \frac{D}{\tau_J} (\omega - 1) + \frac{M_{MX}}{\tau_J} \\ \frac{di_d}{dt} = -L_F i_q \frac{(r_s+r_e)}{L} - \omega L_F i_q \frac{(L_q+L_e)}{L} + \frac{kM_F r_F}{L} i_F - \frac{kM_F}{L} U_F + \frac{L_F U_{\infty} \sqrt{3}}{L} \sin \delta \\ \frac{di_F}{dt} = \frac{kM_F (r_s+r_e)}{L} i_d + \frac{-(L_d-L_e)}{L} r_s i_F + \omega \frac{kM_F (L_q+L_e)}{L} i_q + \frac{(L_d+L_e)}{L} U_F - \frac{kM_F U_{\infty} \sqrt{3} \sin \delta}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{(L_d+L_e)}{(L_q+L_e)} \omega i_d + \frac{kM_F}{(L_q+L_e)} \omega i_F - \frac{(r_s+r_e)}{(L_q+L_e)} i_q - \frac{U_{\infty} \sqrt{3}}{(L_q+L_e)} \cos \delta \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $L = L_F(L_d + L_e) - kM_F^2$; L_d, L_q, L_F - собственные индуктивности обмоток статора по продольной d и поперечной q оси, обмотки возбуждения ротора, M_F - взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, r_s, r_F, r_e - активные сопротивления обмоток статора, обмотки возбуждения ротора и линии электропередачи, U_{∞}, u_F - напряжения шины бесконечной мощности (действующее значение) и обмотки возбуждения ротора, k - постоянная Парка, τ_J - механическая постоянная времени. Все параметры модели, включая токи, напряжения и время, представлены в относительных единицах.

Для определения величины возмущений необходимо синтезировать соответствующие наблюдатели.

Определим уравнение наблюдателя для оценки возмущения, действующего на частоту вращения вала генератора. Учет такого возмущения производится введением возмущения во второе уравнение системы (1):

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{L_d}{3\tau_J} i_q i_d - \frac{kM_F}{3\tau_J} i_q i_F + \frac{L_q}{3\tau_J} i_d i_q - \frac{D}{\tau_J} (\omega - 1) + \frac{M_{MX}}{\tau_J} + f_{B\omega}$$

где $f_{B\omega}$ – некоторая функция неизмеряемого возмущения.

Для упрощения процедуры синтеза введем обозначение:

$$f_{изв\omega} = -\frac{L_d}{3\tau_J} i_q i_d - \frac{kM_F}{3\tau_J} i_q i_F + \frac{L_q}{3\tau_J} i_d i_q - \frac{D}{\tau_J} (\omega - 1) + \frac{M_{MX}}{\tau_J}$$

Для синтеза наблюдателя используем процедуры, изложенные в [2 - 4]. В соответствии с указанными процедурами введем макропеременную, отражающую ошибку оценивания:

$$e_{n1} = f_{B\omega} - \hat{f}_{B\omega} \quad (2)$$

где $\hat{f}_{B\omega}$ – оценка возмущающего воздействия.

В соответствии с известной процедурой синтеза редуцированных наблюдателей [2 - 4] введем уравнение:

$$\dot{\hat{f}}_{B\omega} = S_{1B}(\omega) + \hat{z}_1 \quad (3)$$

где $S_{1B}(\omega)$ – произвольная функция, подлежащая определению в процессе синтеза наблюдателя, \hat{z}_1 – новая переменная.

Для обеспечения асимптотической сходимости оценки потребуем, чтобы ошибка e_{n1} подчинялась решению уравнения:

$$\dot{e}_{n1} + \alpha_{1n} e_{n1} = 0 \quad (4)$$

Подставив уравнения (2), (4) в уравнение (3), получим:

$$0 - \frac{\partial S_{1B}}{\partial \omega} (f_{изв\omega} + f_{B\omega}) - \hat{z}_1 + \alpha_{1n} (f_{B\omega} - S_{1B}(\omega) - \hat{z}_1) = 0 \quad (5)$$

Если выбрать функцию $S_{1B}(\omega)$ так, чтобы уравнение (5) не зависело от неизмеряемого вектора $f_{B\omega}$, то выражение (5) будет являться

асимптотическим наблюдателем. При этом оценка не измеряемой векторной величины $\hat{f}_{B\omega}$ будет определяться в соответствии с выражением (3).

Таким образом, чтобы правая часть выражения (5) не зависела от не измеряемого возмущения $f_{B\omega}$, приравняем все слагаемые, содержащие этот параметр, к нулю. В результате, придем к следующему уравнению и определим $S_{1B}(\omega)$:

$$-\frac{\partial S_{1B}}{\partial \omega} f_{B\omega} + a_{1H} f_{B\omega} = 0; S_{1B}(\omega) = a_{1H} \omega \quad (6)$$

Подставим уравнение (6) в (5), и выразим вектор новых переменных \hat{z}_1 :

$$\dot{\hat{z}}_1 = -a_{1H} \hat{z}_1 - a_{1H}^2 \omega - a_{1H} f_{H3B\omega} \quad (7)$$

Используя уравнения (6) и (7) можем определить уравнение выхода наблюдателя:

$$\hat{f}_{B\omega} = a_{1H} \omega + \hat{z}_1 \quad (8)$$

Для регулирования амплитуды фазного напряжения используем переменную U_F (напряжение возбуждения), входящую в состав дифференциального уравнения по току i_q . Для синтеза наблюдателя будем считать, что в этом уравнение появилось неизмеряемое возмущение:

$$\frac{di_d}{d\tau} = -L_F i_q \frac{(r_s + r_e)}{L} - \omega L_F i_q \frac{(L_q + L_e)}{L} + \frac{kM_F r_F}{L} i_F - \frac{kM_F}{L} U_F + \frac{L_F U_\omega \sqrt{3}}{L} \sin \delta + f_{Bid}$$

Введем замену:

$$f_{H3Bid} = -L_F i_q \frac{(r_s + r_e)}{L} - \omega L_F i_q \frac{(L_q + L_e)}{L} + \frac{kM_F r_F}{L} i_F - \frac{kM_F}{L} U_F + \frac{L_F U_\omega \sqrt{3}}{L} \sin \delta$$

Определим уравнение наблюдателя:

$$\dot{\hat{z}}_1 = -a_{1H} \hat{z}_1 - a_{1H}^2 i_d - a_{1H} f_{H3Bid} \quad (9)$$

$$\hat{f}_{Bid} = a_{1H} i_d + \hat{z}_1 \quad (10)$$

Полученные оценки возмущений используются в замкнутой контуре управления, построенном по принципу беспереходных систем с непрямо́й адаптацией к возмущениям.

Проведем синтез регулятора частоты. Управляющим воздействием является момент на валу M_{MX} . Зададим уравнение, обеспечивающее асимптотическую устойчивость заданного состояния:

$$\dot{e}_1 + a_1 e_1 = 0 \quad (11)$$

где e_1 – ошибка регулирования, определяется как:

$$e_1 = \omega - \omega_0; \quad \dot{e}_1 = \dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} \quad (12)$$

Так как возмущение в $f_{B\omega}$ – неизмеряемое, то вместо самого возмущения используется его оценка:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{L_d}{3\tau_J} i_q i_d - \frac{kM_F}{3\tau_J} i_q i_F + \frac{L_q}{3\tau_J} i_d i_q - \frac{D}{\tau_J} (\omega - 1) + \frac{M_{MX}}{\tau_J} + \hat{f}_{B\omega} \quad (13)$$

Введем обозначение:

$$f_{\omega s} = -\frac{L_d}{3\tau_J} i_q i_d - \frac{kM_F}{3\tau_J} i_q i_F + \frac{L_q}{3\tau_J} i_d i_q - \frac{D}{\tau_J} (\omega - 1) \quad (14)$$

Используя (12), (14), (14) запишем (11) следующим образом:

$$f_{\omega s} + \frac{M_{MX}}{\tau_J} + \hat{f}_{B\omega} + a_1 \omega - a_1 \omega_0 = 0 \quad (15)$$

Выразим из (15) M_{MX} :

$$M_{MX} = (a_1 \omega_0 - a_1 \omega - f_{\omega s} - \hat{f}_{B\omega}) \tau_J \quad (16)$$

Уравнение (16) является искомым уравнением регулирования частоты с наблюдателем.

Проведем синтез регулятора амплитуды фазного напряжения.

$$\dot{e}_2 + a_2 e_2 = 0 \quad (17)$$

$$e_2 = U_{bc} - U_{bc0} \quad (18)$$

В работе [5] фазное напряжение генератора для активной нагрузки задано в виде:

$$U_{bc} = \sqrt{3}(-i_d \sin(\delta) + i_q \cos(\delta)) R_n \quad (19)$$

Из (18) и (19) следует, что e_2 будет иметь вид:

$$e_2 = \sqrt{3}(-i_d \sin(\delta) + i_q \cos(\delta)) R_n - U_{bc0}$$

Определим производную ошибки регулирования:

$$\dot{e}_2 = -\sqrt{3}(\cos(\delta) \frac{d\delta}{d\tau} i_d + \sin \delta \frac{di_d}{d\tau} + \sin \delta \frac{d\delta}{d\tau} i_q - \cos \delta \frac{di_q}{d\tau}) R_n \quad (20)$$

Так как в (20) фигурируют производные $\frac{di_d}{d\tau}$ и $\frac{di_q}{d\tau}$, введем сокращения:

$$f_d = -L_F i_q \frac{(r_s+r_e)}{L} - \omega L_F i_q \frac{(L_q+L_e)}{L} + \frac{kM_F r_F}{L} i_F + \frac{L_F U_{\infty} \sqrt{3}}{L} \sin \delta \quad (21)$$

$$f_q = \frac{(L_d+L_e)}{(L_q+L_e)} \omega i_d + \frac{kM_F}{(L_q+L_e)} \omega i_F - \frac{(r_s+r_e)}{(L_q+L_e)} i_q - \frac{U_{\infty} \sqrt{3}}{(L_q+L_e)} \cos \delta \quad (22)$$

Подставим (21), (22) с учётом того, что в уравнение производной тока необходимо оценки возмущений:

$$\dot{e}_2 = -\sqrt{3} R_n \left(\cos \delta (\omega - 1) i_d + \sin \delta \left(f_d - \frac{kM_F}{L} U_F + \hat{f}_{B1d} \right) + \sin \delta (\omega - 1) i_q - \cos \delta f_q \right)$$

Введем обозначения:

$$e_{tz} = -\sqrt{3} R_n \left(\cos \delta (\omega - 1) i_d + \sin \delta (f_d + \hat{f}_{B1d}) + \sin \delta (\omega - 1) i_q - \cos \delta f_q \right)$$

Тогда (22) принимает вид:

$$\sqrt{3} R_n \sin \delta \frac{kM_F}{L} U_F + e_{tz} + a_2 e_2 = 0 \quad (23)$$

Выразим напряжение возбуждения из (39):

$$U_F = \frac{-(e_{tz} + a_2 e_2) L}{\sqrt{3} R_n \sin \delta kM_F} \quad (24)$$

Уравнение (24) является вторым искомым уравнением регулятора напряжения с оценкой возмущения.

Таким образом, мы получили систему уравнений автоматического регулирования (уравнения (16), (24)) способного корректировать работу синхронного генератора в зависимости от действующих на него возмущений.

Параметры СГ, работающего на систему бесконечной мощности через линию электропередачи представлены в таблице 1 в относительных единицах (о.е.).

Параметры синхронного генератора

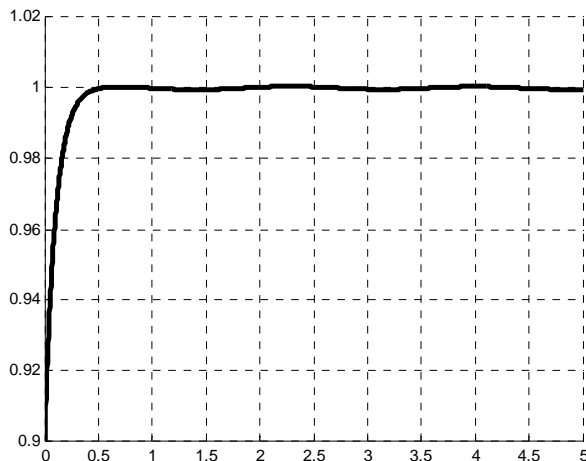
№	Параметр	Значение (о.е.)	№	Параметр	Значение (о.е.)	№	Параметр	Значение (о.е.)
1	L	1	7	kM_F	0.923	13	R_a	10
2	L_d	0.973	8	r_s	0.005	14	ω_0	1
3	L_B	0.997	9	r_B	0.005	15	A_{abc}	1
4	L_q	0.55	10	r_f	0.14	16	a_1	1
5	L_F	1.088	11	D	0	17	a_2	10
6	τ_j	10	12	U_∞	1			

Быстродействие наблюдателя определяются параметрами

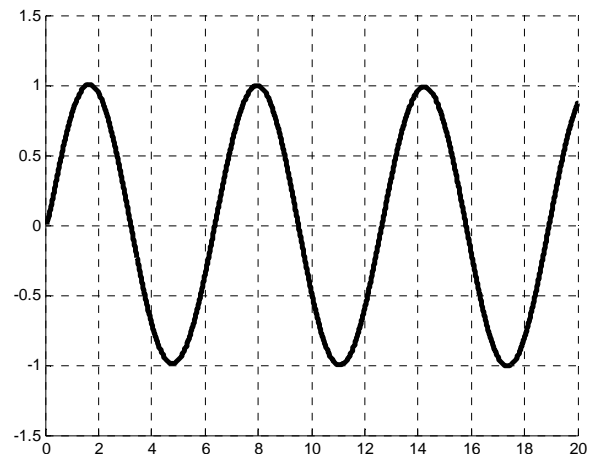
$a_{1n} = 50, a_{2n} = 50$, обеспечивающими быстродействие около 0,1 с.

Результаты моделирования при параметрах, представленных в таблице 1, изображены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 а и б изображены переходные процессы и установившийся режим угла δ и угловой скорости ω синхронного генератора соответственно. Наблюдается достаточно качественный переходный процесс, без колебательных включений, время переходного процесса около 0.5 с. В установившемся режиме наблюдаются небольшие колебания, обусловленные воздействием гармонических возмущений. Уменьшение этих колебаний может решаться посредством увеличения быстродействия как регулятора, так и наблюдателя.



а)



б)

Рис. 1 – а) переходный процесс угловой скорости в течение времени t ; б) фазное напряжения

На рис. 3 представлены результаты работы синтезированного наблюдателя (7), (8) и (9), (10). Сплошной линией на графике обозначена наблюдаемая функция, пунктирной – оценка этой функции. Результаты подтверждают устойчивость и заданное качество наблюдателя, быстродействие которого теоретически определяется параметром α_{1n} для частоты, и α_{2n} для амплитуды фазного напряжения. При этом ошибка оценивания определяется быстродействием синтезированного наблюдателя и скоростью изменения оцениваемого сигнала.

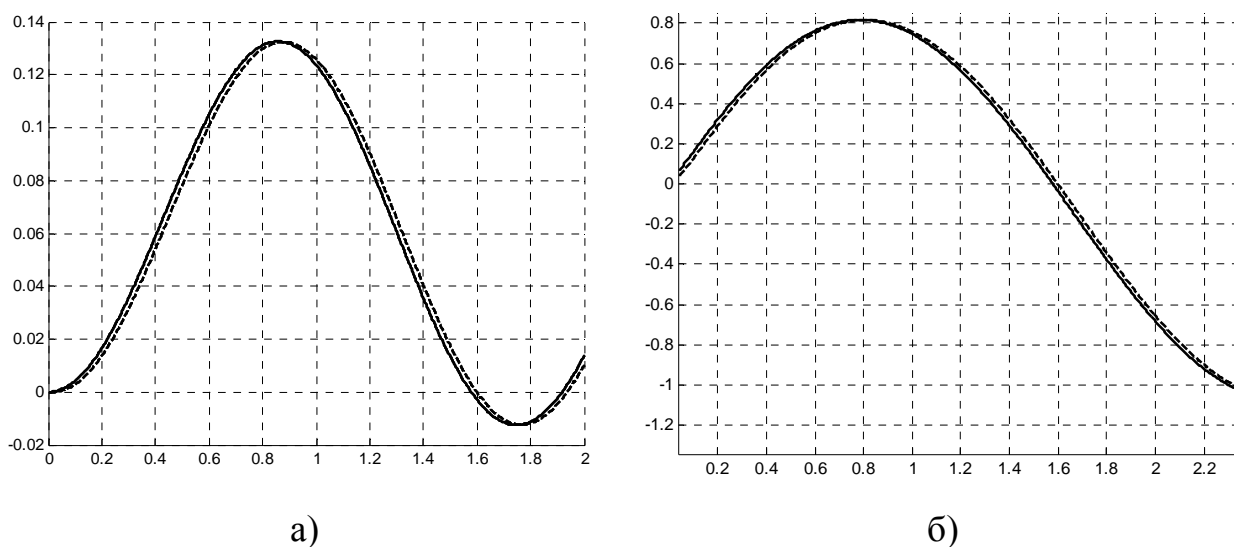


Рис. 2 – а) оценка наблюдателем шума в уравнении частоты; б) оценка наблюдателем шума в уравнении тока i_d

Повышение качества работы системы автоматического управления и синхронного генератора в принципе, может быть достигнуто за счет синтеза в уравнения регулятора наблюдателя возмущений. Это позволит оценивать и компенсировать внешние, параметрические или структурные возмущения, возникающие в процессе работы генератора, что, в свою очередь, повысит устойчивость и надежность энергосистемы. В работе представлен алгоритм синтеза наблюдателя и его интеграции в систему уравнений регулятора автоматического управления.

Проведенное моделирование показало высокую устойчивость наблюдателя, качество переходных процессов и установившихся режимов работы параметров состояния модели синхронного генератора, а качество оценки наблюдателем может быть повышено за счет увеличения параметров быстродействия наблюдателя и регулятора.

Литература:

1. Али З.М. Способы улучшения качества регулирования и устойчивости электротехнических комплексов с генерирующими источниками// Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань, 2010г. – С. 6 – 9.

2. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с. ISBN 978-5-02-037509-3.

3. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3(104). – С. 187 – 196.

4. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами. // Мехатроника, автоматизация и управление. 2006, № 6. С. 17 – 22.

5. Шевченко В.А. Исследование математической модели и синтез системы автоматического регулирования частоты и амплитуды напряжения синхронного генератора электростанции // Материалы Седьмой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. С. 151-157.

6. Medvedev M.Y., Pshikhopov V.Kh., Robust control of nonlinear dynamic systems // Proc. of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications. September 14 – 17, 2010, Bogota, Colombia. ISBN: 978-1-4244-7172-0. – p.72-77.

7. В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/431> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. V.A. Shevchenko Development and research of system of automatic control by the synchronous generator // Proceedings of the 26th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS2013). July 16-19, 2013, Guilin, Guangxi, China. Session 30: System operation, control, diagnosis and prognosis. – p.205-213.

9. О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков Математическое описание алгоритма управления топливоподачей дизель-генераторной электростанции переменной скорости вращения [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3, – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

10. В. Н. Вариводов, А. Г. Мордкович, Е. И. Остапенко Основные направления создания комплекса оборудования для интеллектуальных электрических сетей// Журнал «Электротехнический рынок» выпуск 2011г. №4. – с.51-56.