

УДК 621.313, 681.5.01, 681.516, 621.3.078

О.Н. АГАМАЛОВ (канд. техн. наук)

Ташлыкская гидроаккумулирующая электростанция (ТГАЭС)

olegagamalov@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН ПО ФАЗОРУ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТОРА

В статье рассмотрена новая структура автоматического регулятора возбуждения (АРВ) синхронных машин. Ключевой особенностью предлагаемого АРВ является использование только фазора напряжения статора для решения задачи регулирования величины напряжения статора и демпфирования электромеханических колебаний ротора синхронной машины, что значительно снижает влияние помех и возмущений, упрощает его конструкцию и эксплуатацию.

Ключевые слова: фазор напряжения статора, АРВ, регулирование величины напряжения статора, демпфирование электромеханических колебаний ротора, устойчивость, производная Виртингера, антиградиент, функция ошибки комплексного аргумента.

Введение. В настоящее время, в теории и практике систем автоматического управления возбуждением (САУВ) синхронных машин, основополагающую роль играет обратная связь по величине напряжения статора [1]. Управление возбуждением осуществляется на основе вычисления скалярной ошибки рассогласования между заданным значением (уставкой) V_{ref} и измеренным напряжением статора V_t . Полученное скалярное рассогласование $\Delta V = V_{ref} - V_t$ используется в качестве входного сигнала ПИД-регулятора или его усеченных вариантов (ПД, ПИ) [2] для регулирования тока возбуждения I_f синхронной машины. Задачей данного регулирования является точное поддержание V_t в соответствии с заданным значением V_{ref} во всех возможных эксплуатационных режимах, для чего устанавливается по возможности большее значение коэффициента П-регулирования. Однако, как было определено теоретически и наблюдается на практике [1], в некоторых режимах работы синхронных машин это приводит к снижению демпферной составляющей электрического момента T_D пропорциональной изменению скорости вращения $\Delta\omega$ и, как следствие, колебанию их роторов при возникновении возмущений в энергосистеме. Поэтому дополнительно, в САУВ синхронных машин, используются обратные связи по параметрам, характеризующим движение ротора – отклонению частоты напряжения статора Δf , отклонению частоты вращения ротора $\Delta\omega$ или ускоряющей мощности P_a (стабилизирующие каналы САУВ или PSS – power system stabilizer). Это значительно усложняет разработку, последующую координацию каналов регулирования и стабилизации и пусконаладку САУВ синхронных машин.

Поэтому представляет интерес разработка САУВ, реализующей новый тип комплексной обратной связи [3], структура которой одновременно отражает как состояние напряжения статора, так и движение ротора синхронной машины. Для этого необходимо увеличить размерность ошибки рассогласования ΔV таким образом, чтобы она отражала как отклонения напряжения статора, так и движения ротора синхронной машины (ее электромагнитное и электромеханическое состояния). Данному требованию соответствует использование в качестве входного сигнала САУВ фазора (вращающегося комплексного вектора) напряжения статора синхронной машины. Постановка вышеуказанной задачи и ее решение приведены в данной статье.

Функция ошибки комплексного аргумента. Инерционность и физические принципы работы объектов управления, а также конечная скорость распространения сигналов в системах автоматического управления (САУ), являются причиной фазовых запаздываний, наблюдаемых между сигналами входа (уставки), переменными состояниями и выхода. Введем для ошибки, зависящей от фазового запаздывания по выходу объекта управления, следующее:

Определение 1. Функцией ошибки комплексного аргумента (ФОКА) называется разность между входом (уставкой) \bar{r} и выходом \bar{y} объекта управления, вычисляемая на комплексной плоскости S , действительная ось R которой определена направлением комплексного вектора \bar{r} , а мнимая ось I смещена на угол $\pi/2$ в декартовой системе координат, что позволяет учесть отклонение фазового запаздывания $\Delta\varphi$ комплексного вектора выхода объекта управления \bar{y} относительно входа (оси R) при нарушении устойчивости. $\Delta\varphi$, действительная (синфазная) e_R и мнимая (квадратурная) e_I составляющие ФОКА в декартовой системе координат, а также модуль e и аргумент δ в полярной системе координат, вычисляются из рис. 1:

возбуждения $\Delta\psi_{fd}$ при различных частотах электромеханических колебаний, приведенные к отклонению угла ротора $\Delta\delta = 1$ рад и с учетом $-j\omega\Delta\delta = -\omega_0\Delta\omega_r = -314.15\Delta\omega_r$ для $f_0 = 50$ Гц:

Таблица 1 – Расчетные значения синхронизирующего ΔT_{eES} и демпферного ΔT_{eED} моментов.

f, Гц	ω , рад/с	$\Delta T_S = K_1 + \Delta T_{eES}$, о.е. момента/рад.	$\Delta T_D = \Delta T_{eED}$, о.е. момента/(рад./с)
0.2	1.25	2.326	58.950
0.6	3.77	1.998	32.295
1.0	6.28	1.820	17.836
1.6	10.05	1.717	9.475
2.0	12.56	1.688	7.091

Рассмотренная выше модель была смоделирована в MATLAB[8]. Анализ полученных переходных процессов показывает, что САУВ синхронного гидрогенератора по фазу напряжения статора обеспечивает точность поддержания напряжения и устойчивость. Также можно отметить, что моделирование рассматриваемой САУВ выявило ее свойства грубости (робастности) как к изменению параметров моделируемого синхронного гидрогенератора так и энергосистемы.

Выводы. САУВ по фазу напряжения статора синхронной машины обеспечивает управление по ее электромагнитному и электромеханическому состояниям и позволяет естественным образом скоординировать решение задач поддержания напряжения статора в соответствии с заданной уставкой и демпфирования электромеханических колебаний ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kundur P. Power System Stability and Control / P. Kundur. – New York: McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
2. IEEE Std3.421.5-2005. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005. – 85 p.
3. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи: управление при неопределенности / С. В. Емельянов, С. К. Коровин – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352с.: ил.
4. Poularikas A. D. The Transforms and Applications Handbook: Second Edition / A. D. Poularikas. – CRC Press, 2000, 1335 p.
5. Kreutz-Delgado K. The complex gradient operator and the CR-calculus / K. Kreutz-Delgado // VERSION UCSD-ECE275CG-S2009v1.0, 2009. – 74 p. Режимдоступа: <http://arxiv.org/pdf/0906.4835.pdf>.
6. Remmert R. Theory of Complex Functions / R. Remmert. – Springer-Verlag, 1991. – 453 p.
7. Agamalov O. N. AVR/PSS Structure by Terminal Voltage Phasor / O. N. Agamalov // AASRI Procedia Published by Elsevier B. V. selection and/or peer review under responsibility of American Applied Science Research Institute. – 2012. – Vol. 2. – p. 2-7.
8. SimPowerSystems for use with Simulink. User's guide. Version 4. – 2005. –1110 p.

REFERENCES

1. Kundur P. Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
2. IEEE Std3.421.5-2005. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005. – 85 p.
3. Emelyanov S. V., Korovin S. K. *Novye tipy obratnoi svyazi: upravlenie pri neopredelennosti* [Control of complex and uncertain systems: new types of feedback] /. – Springer, 2000. – 322 p.
4. Poularikas A. D. The Transforms and Applications Handbook: Second Edition. – CRC Press, 2000, 1335 p.
5. Kreutz-Delgado K. The complex gradient operator and the CR-calculus. VERSION UCSD-ECE275CG-S2009v1.0, 2009. – 74 p. <http://arxiv.org/pdf/0906.4835.pdf>.
6. Remmert R. Theory of Complex Functions. – Springer-Verlag, 1991. – 453 p.
7. Agamalov O. N. AVR/PSS Structure by Terminal Voltage Phasor. AASRI Procedia Published by Elsevier B. V. selection and/or peer review under responsibility of American Applied Science Research Institute. – 2012. – Vol. 2. – p. 2-7.
8. SimPowerSystems for use with Simulink. User's guide. Version 4. – 2005. –1110 p.

Надійшла до редакції 01.04.13

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

О. М. АГАМАЛОВ,
Ташлицька гідроакумулююча електростанція

Управління збудженням синхронних машин по фазору напруги статора. В статті розглянута нова структура автоматичних регуляторів збудження (АРЗ) синхронних машин. Відомо, що основними задачами, які вирішує АРЗ, є підтримання напруги статора синхронної машини у відповідності з заданою уставкою та демпфірування електромеханічних коливань ротору синхронної машини при різноманітних збуреннях. Для цього в якості вхідних сигналів АРЗ використовується множина змінних стану синхронної машини: напруга та струм статора, частота, швидкість обертання ротору, потужність та інше. Ключовою особливістю пропонованого АРЗ є використання тільки фазору напруги статора для вирішення всіх вищевказаних задач, що значно зменшує вплив завад та збурень, спрощує його конструкцію та експлуатацію.

Ключові слова: фазор напруги статора, АРЗ, регулювання величини напруги статора, демпфірування електромеханічних коливань ротору, стійкість, похідна Віртингера, антиградієнт, функція похибки комплексного аргументу.

О. AGAMALOV
Tashlyk Pump Storage Power Plant

Excitation Control of the Synchronous Machines by Terminal Voltage Phasor. In paper the new structure of the automatic voltage regulator (AVR) and power system stabilizer (PSS) of the synchronous machines is considered. It is known, that the primary goal, that solved AVR are maintenance of a terminal voltage of the synchronous machine according to the reference. For PSS the goal is mitigation the electromechanical oscillations of the synchronous machine at various disturbances. For these purposes as inputs of AVR and PSS the set of state variables of the synchronous machine is used: terminal voltage, armature current, frequency, speed, power, etc. In proposed excitation controller as input used only the phasor of terminal voltage of the synchronous machine. In fact, the proposed controller (7) is proportional (P-controller), gain of it is depended by deviation the phase delay or deviation of the rotor angle in transients. That provides it high adaptive and robust properties. Excitation control system by terminal voltage phasor of the synchronous machine provides control of it electromagnetic and electromechanical states, and allows us to natural way coordinate the AVR/PSS tasks. The key feature of offered excitation controller is use only the phasor terminal voltage for the decision of all above-stated problems, that considerably reduces influence of noises and disturbances, simplifies its design and operation.

Key words: terminal voltage phasor, AVR, control by terminal voltage magnitude, damping by rotor electromechanical oscillation, stability, Wirtinger derivative, anti-gradient, complex argument error function.