

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН В ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ*

О.Н. Агамалов¹, канд.техн.наук, А.Ф. Буткевич², докт.техн.наук

¹ - Ташлыкская гидроаккумулирующая электростанция обособленного подразделения Южно-Украинская атомная электростанция Национальной атомной генерирующей компании «Энергоатом», Южноукраинск, 55000, Украина,
e-mail: olegagamalov@gmail.com

² - Институт электродинамики Национальной академии наук Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,
e-mail: butkevych@ied.org.ua

Изложены некоторые особенности построения интегрированной системы автоматического управления возбуждением синхронных машин (САУВ СМ) в объединенной энергосистеме (ОЭС) с использованием устройств векторных измерений и САУВ СМ с модульно-фазовым автоматическим регулятором возбуждения. Основное назначение такой системы – демпфирование низкочастотных электромеханических колебаний в ОЭС. Библиографический список – 10, рис. 1.

Ключевые слова: объединенная энергосистема, автоматическое управление возбуждением синхронных машин, низкочастотные колебания, демпфирование, устройство векторных измерений.

Цель создания интегрированной САУВ СМ. Среди аварий, возникающих время от времени в объединенных электроэнергетических системах (ОЭС) мира, есть и те, что обусловлены неудовлетворительным демпфированием низкочастотных электромеханических колебаний (НЧК), которым в англоязычной терминологии соответствуют *inter-area oscillations*. Последствия таких аварий – прекращение параллельной работы энергосистем (ЭС) с обесточиванием большого количества потребителей электроэнергии. Решению проблемы эффективного демпфирования НЧК способствует использование в ОЭС информационных технологий, включая технологию векторных измерений, реализуемую на уровне объектов ОЭС устройствами *PMUs* (распространенная аббревиатура от *Phasor Measurement Units*), украинский аналог которых, разработанный в Институте электродинамики НАН Украины, – электроизмерительный регистрирующий прибор (ЭИРП) "Регина-Ч".

Основная роль в решении проблемы демпфирования НЧК и улучшения динамических свойств ОЭС принадлежит *системным стабилизаторам PSS* (аббревиатура от *power system stabilizer*) в составе *систем автоматического управления возбуждением* (САУВ) синхронных машин (СМ). Их использование оправданно как в аспекте функциональной эффективности, так и в аспекте экономической целесообразности (заметим, что в САУВ с автоматическими регуляторами возбуждения сильного действия *PSS* структурно не выделены). Вместе с тем, как отмечается в [9], при достаточном аппаратном развитии вышеуказанных систем основным препятствием на пути их дальнейшего совершенствования является отсутствие алгоритмов управления, использующих вращающиеся комплексные векторы (фазоры) напряжения. Совместное согласованное использование в ОЭС *PMUs* и САУВ СМ позволит реализовать интегрированную САУВ (ИСАУВ) СМ, предназначенную для эффективного демпфирования вышеуказанных НЧК и улучшения динамических свойств ОЭС.

Особенности построения интегрированной САУВ СМ. Достаточно объективную характеристику динамических свойств ОЭС дают моды электромеханических колебаний, частоты которых соответствуют собственным частотам ОЭС (далее такие моды будем называть *доминирующими*). Каждая *i*-я мода характеризуется рядом параметров, основные из которых: вещественная α_i [с⁻¹] и мнимая ω_i [рад./с] ($\omega_i = 2\pi f_i$) составляющие собственных значений матрицы состояния (характеристической матрицы) ОЭС или, иными словами, постоянная демпфирования (отношение демпфирования) α_i и частота f_i [Гц]. Показатель демпфирования – модальный параметр, вычисляемый на основании

*Работа выполняется в рамках научного проекта целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины "Научно-техническое, нормативное и информационное обеспечение создания гибкой и адаптивной объединенной энергетической системы Украины" ("Об'єднання-2").

двух предыдущих: $\zeta_i = -\alpha_i (\alpha_i^2 + \omega_i^2)^{-0,5}$. Он характеризует “расположенность” ОЭС к возникновению колебаний (в зависимости от близости к нулю положительного значения ζ_i) или к их усилению (в зависимости от отрицательного значения ζ_i) на частоте данной моды. По изменению амплитуды моды A_i тоже можно судить об изменении энергии соответствующей составляющей колебаний, но, тем не менее, этот параметр, в отличие от ζ_i , менее информативен. Наличие в колебаниях режимных параметров ОЭС низкочастотных (≤ 1 Гц) мод с близкими к нулю положительными постоянными демпфирования свидетельствует о потенциальной угрозе возникновения НЧК.

Изменение некоторого базового режима ОЭС, в том числе его утяжеление в определенных сечениях ОЭС, изменение настроек САУВ СМ и др., могут приводить к изменению доминирующих модальных постоянных демпфирования и некоторому изменению соответствующих модальных частот. Тем не менее, доминирующие моды остаются “порождением” определенных групп СМ (роторы СМ одной группы колеблются в противофазе относительно роторов СМ другой группы на доминирующих модальных частотах), а указанные изменения частот, вызванные изменением режимов ОЭС, все равно будут “узнаваемыми” [1]. Следовательно, с выявлением в электромеханических колебаниях наличия опасных доминирующих мод будут определяться и группы СМ, “породивших” соответствующие моды (при условии, что такие группы СМ и соответствующие им модальные частоты установлены априори). Количественно оценить роль каждой СМ в возникновении составляющих НЧК можно через коэффициенты участия соответствующих переменных, вычисляемые как произведение левых и правых собственных векторов характеристической матрицы ОЭС. Но для указанного оценивания надо располагать программными средствами моделирования режимов ОЭС и модального анализа. Вместе с тем, вышеуказанные группы СМ можно определить и не располагая средствами модального анализа, а используя традиционные программные средства моделирования электромеханических переходных процессов в ЭС (для формирования выборок данных, характеризующих изменение во времени определенных параметров режима ЭС) и средства анализа сигналов (для анализа сформированных выборок данных). Заметим, что возникновение НЧК в ОЭС проявляется, прежде всего, в потоках активной мощности в определенных сечениях ОЭС, по разные стороны которых находятся вышеуказанные группы СМ. Из-за слабости межсистемных связей возникновение плохо демпфируемых НЧК создает угрозу колебательного нарушения устойчивости ОЭС. И хотя САУВ разных СМ в ОЭС и вносят свой “вклад” в демпфирование возникающих НЧК, очевидно, что более эффективной может быть реализация управляющих воздействий на САУВ именно тех СМ, которые образуют вышеуказанные группы. В случае возникновения существенных структурно-параметрических изменений в ОЭС ее динамические свойства могут претерпевать изменения, поэтому собственные частоты ОЭС (как и состав соответствующих вышеуказанных групп СМ) тоже подлежат уточнению.

Архитектура ИСАУВ СМ в ОЭС во многом зависит от мест размещения *PMUs*, топологических особенностей системообразующей электрической сети ОЭС и ее межсистемных связей. От надежности определения доминирующих модальных частот и соответствующих показателей демпфирования, предшествующих выработке и реализации селективных управляющих воздействий, во многом зависит эффективность ИСАУВ СМ. В зарубежных ОЭС задачи обработки результатов синхронизированных измерений режимных параметров с целью использования результатов такой обработки современными системами управления решаются, как правило, *синхрофазорными векторными процессорами* (СВП) [10]. Технические характеристики существующих СВП свидетельствуют о том, что они могут быть использованы и при создании ИСАУВ СМ. Одновременно возникает вопрос о возможности построения ИСАУВ СМ в условиях ОЭС Украины, не прибегая к приобретению СВП зарубежного производства. Остановимся на этих вопросах подробнее.

Если исходить из условия, что *PMUs* размещены на всех электростанциях ОЭС и там же (например, на верхнем, “серверном” уровне ЭИРП “Регина-Ч”) осуществляется идентификация доминирующих мод с определением соответствующих показателей демпфирования, то практическая реализация ИСАУВ СМ значительно упрощается, поскольку выявленные в реальном времени опасные для функционирования ОЭС моды должны на той же электростанции “подавляться” соответствующими САУВ СМ. И готовыми к такому “подавлению” должны быть, прежде всего, САУВ тех СМ, которые принадлежат вышеуказанным группам, определенным заблаговременно. Однако, в действительности размещение *PMUs* в ОЭС имеет “многоцелевой” характер, поскольку изначально *PMUs* – это устрой-

ства объектного уровня современных систем мониторинга *WAMS* (*Wide Area Measurement Systems*), и лишь затем – систем управления *WACS* (*Wide Area Control Systems*) и защиты *WAPS* (*Wide Area Protection Schemes*) в ОЭС. Поэтому *PMUs* устанавливаются пока еще выборочно как на электростанциях, так и на основных (в схемно-режимном аспекте) электрических подстанциях системообразующей сети. Если ориентироваться на реализацию ИСАУВ СМ без использования вышеуказанных СВП зарубежного производства, то основная задача – идентификация доминирующих мод и определение соответствующих показателей демпфирования – должна решаться за счет вычислительных ресурсов *PMUs* (ЭИРП "Регина-Ч"). Коротко остановимся на некоторых особенностях ее решения. Несмотря на наличие многих методов анализа сигналов, например, [4-8], далеко не все из них в равной мере оказываются пригодными для решения вышеуказанной задачи: следует учитывать, что причины возникновения НЧК могут быть разными, влияющими на вид сигналов, подлежащих анализу. Кроме того, требования быстродействия, робастности, высокой "разрешающей способности" и др. тоже играют не последнюю роль. Результаты выполненных исследований, в частности [7], показывают, что для *on-line* идентификации доминирующих модальных частот целесообразно "параллельно" использовать определенный "набор" наиболее подходящих для решения этой задачи методов (соответствующих программных процедур). Каждый из методов такого "набора" имеет свои плюсы и минусы, поэтому задача "параллельного" использования методов – нивелировать присущие им минусы, обеспечив надежность *on-line* идентификации доминирующих мод колебаний. Повышению эффективности указанной идентификации способствует использование "скользящих" выборок данных (окон наблюдения оптимальной ширины), касающихся разных режимных параметров, которые могут отличаться составом содержащихся мод. Эти вопросы, как и вопросы, касающиеся методов из вышеуказанного "набора", заслуживают отдельного рассмотрения, поэтому здесь на них останавливаться не будем.

Идентификация мод электромеханических колебаний, на которые должны реагировать *PSS* ИСАУВ СМ, осуществляется в заданном диапазоне частот $f_L \div f_H$, где f_L , f_H – соответственно нижняя и верхняя границы диапазона НЧК, характерных для ОЭС. Частоты f_i выявленных мод сравниваются с априори известными значениями f_m , характеризующими вышеуказанное взаимное движение в противофазе роторов определенных групп СМ: $|f_m - f_i| \leq \Delta f_{\Pi}$, где Δf_{Π} – заданное максимально допустимое расхождение в значениях идентифицируемых и априори известных частот. Если такое сравнение дает удовлетворительный результат, то проверяется условие необходимости активации *PSS* САУВ тех СМ, которые образуют вышеуказанные группы СМ: $\zeta_i \leq \zeta_{\Pi}$ (ζ_{Π} – заданное "пороговое" значение показателя демпфирования). Дополнительным показателем необходимости "подавления" i -й моды может быть превышение ее амплитудой A_i некоторого заданного "порогового" значения A_{Π} : $A_i \geq A_{\Pi}$.

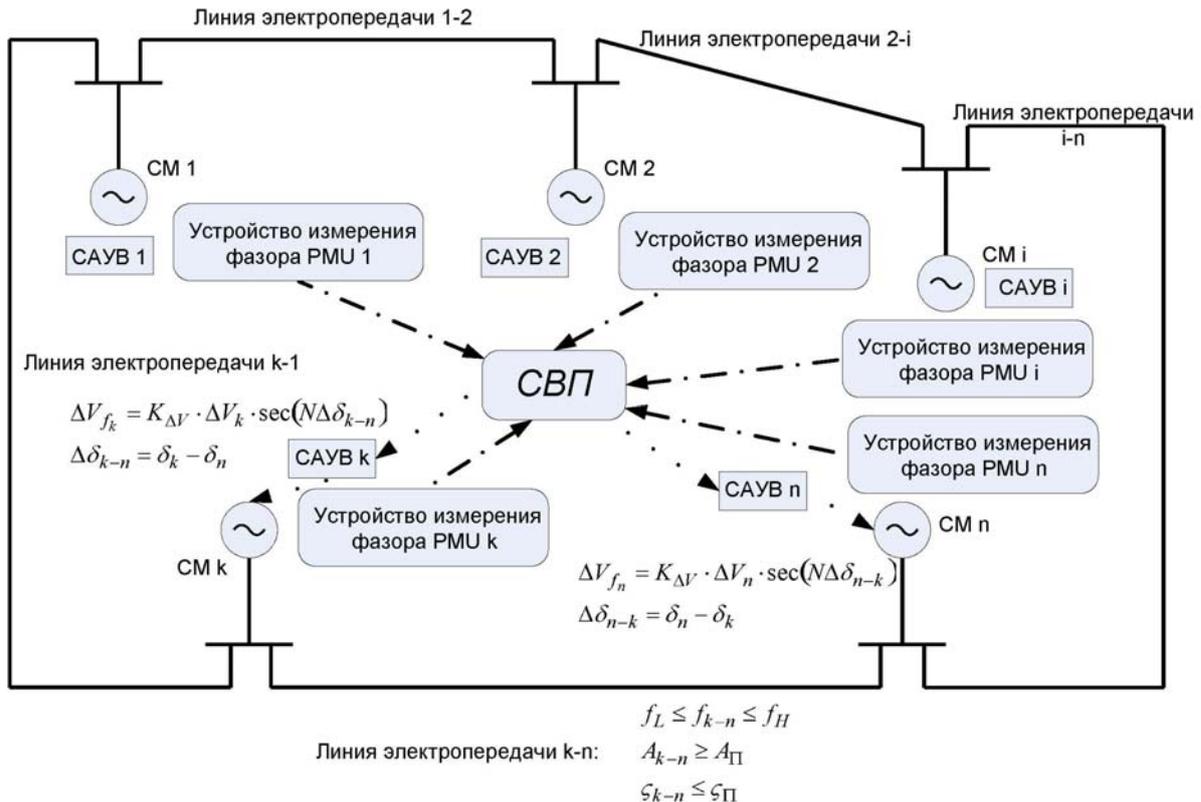
Теперь предположим, что в заданном диапазоне частот выявлена j -я мода, не относящаяся к "узнаваемым", т.е. $|f_m - f_j| \geq \Delta f_{\Pi}$, и в силу $\zeta_j \leq \zeta_{\Pi}$ подлежащая демпфированию. Очевидно, что в этом случае наибольшую угрозу НЧК будут представлять для того сечения или межсистемной связи ОЭС, в котором амплитуда j -й моды (на частоте f_j) колебаний потока активной мощности будет максимальной. Поскольку информация о "прописке" данной моды у определенных групп СМ априори отсутствует, то положительного демпфирующего эффекта можно достичь, воздействуя на САУВ СМ, ближе всех расположенных по обе стороны указанного сечения (межсистемной связи) ОЭС. Для решения задач регулирования напряжения и демпфирования электромеханических колебаний в САУВ СМ будем использовать структуру модульно-фазового автоматического регулятора возбуждения (АРВ-МФ) [2,3]. Поясним вышеизложенное с помощью рисунка, представляющего общую структуру и обмен информацией в ИСАУВ СМ, реализуемой с использованием СВП или его аналога, на примере ОЭС со структурой кольцевого типа. СВП, используя информацию, получаемую от *PMUs*, определяет опасную для $(k-n)$ -й линии электропередачи (сечения) ОЭС моду электромеханических колебаний (нижние индексы параметров этой моды указывают на ее максимальное "проявление" в сечении $k-n$): $f_L \leq f_{k-n} \leq f_H$, $A_{k-n} \geq A_{\Pi}$, $\zeta_{k-n} \leq \zeta_{\Pi}$. Затем СВП формирует управляющие сигналы для САУВ тех СМ (САУВ групп СМ), что подключены к k -ой и n -ой шинам ОЭС, находящимся по

разные стороны сечения $k-n$. При приеме таких сигналов в указанных САУВ СМ вводятся в действие PSS, реализующие закон управления [3]

$$\Delta V_{f_k} = K_{\Delta V} \cdot \Delta V_k \cdot \sec(N \Delta \delta_{k-n}), \quad \Delta \delta_{k-n} = \delta_k - \delta_n,$$

$$\Delta V_{f_n} = K_{\Delta V} \cdot \Delta V_n \cdot \sec(N \Delta \delta_{n-k}), \quad \Delta \delta_{n-k} = \delta_n - \delta_k,$$

или изменяется коэффициент N для усиления воздействия по изменению угла ($\Delta \delta_{k-n}$, $\Delta \delta_{n-k}$).



Выводы. Специализированная обработка данных, поступающих от *PMUs*, позволяет реализовать ИСАУВ СМ ОЭС с целью демпфирования НЧК и улучшения динамических свойств ОЭС за счет селективного использования САУВ СМ с АРВ-МФ и учета топологии сети, обеспечивающих эффективное “подавление” доминирующих мод электромеханических колебаний.

УДК 621.311:621.3.078:681.5.01:681.516

ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ СИНХРОННИХ МАШИН В ОБ'ЄДНАНІЙ ЕНЕРГОСИСТЕМІ

О.М.Агамалов¹, канд.техн.наук, О.Ф.Буткевич², докт.техн.наук

¹ – Ташлицька гідроакмулююча електростанція відокремленого підрозділу Южно-Українська атомна електростанція Національної атомної генеруючої компанії «Енергоатом»,

Южноукраїнськ, 55000, Україна,

e-mail: olegagamalov@gmail.com

² – Інститут електродинаміки Національної академії наук України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: butkevych@ied.org.ua

Викладено деякі особливості побудови інтегрованої системи автоматичного керування збудженням синхронних машин (САКЗ СМ) в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) з використанням пристроїв векторних вимірювань та САКЗ СМ з модульно-фазовим автоматичним регулятором збудження. Основне призначення такої систе-

ми – демпфірування низькочастотних електромеханічних коливань в ОЕС. Бібл. 10, рис. 1.

Ключові слова: об'єднана енергосистема, автоматичне керування збудженням синхронних машин, низькочастотні коливання, демпфірування, пристрій векторних вимірювань.

THE QUESTIONS OF AN INTEGRATED EXCITATION CONTROL SYSTEM OF SYNCHRONOUS MACHINES CONSTRUCTION IN THE INTERCONNECTED POWER SYSTEM

O.M.Agamalov¹, O.F.Butkevych²

¹ – Tashlyk pumped-storage power plant of separate division South-Ukrainian nuclear power plant of National Nuclear Generating Company “Energoatom”, Yuzhnoukrainsk, 55000, Ukraine,

e-mail: olegagamalov@gmail.com

² – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine, Peremohy av., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

e-mail: butkevych@ied.org.ua

Some peculiarities of an integrated automatic excitation control system of synchronous machines (AECS SM) construction in an interconnected power system (IPS) are presented. Phasor measurement units and AECS SM with magnitude-phase excitation controller are used in such construction. The main purpose of such system is to damp low-frequency electromechanical oscillations in IPS. References 10, figure 1.

Keywords: Interconnected power system, automatic excitation control of synchronous machines, low-frequency oscillations, damping, phasor measurement unit.

1. Butkevych O.F. Problem-oriented monitoring of the Ukrainian IPS operation conditions // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2007. – No 5. – Pp. 39-52. (Ukr)

2. Agamalov O. Physical Processes in the Damping of Electromechanical Oscillations of the Synchronous Machine with Magnitude-Phase Excitation Controller // *International Journal of Energy and Power Engineering*. – 2013. – Vol. 2. – No 4. – Pp. 164-171. [Online].

Available at: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.ijepe.20130204.14.pdf>

3. Butkevych O., Agamalov O. Power System Stability and Robustness of Synchronous Machine's Excitation Control with Magnitude-Phase Voltage Regulator // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 5. – Pp. 41-43.

4. Hauer J.F., Demeure C.J., Scharf L.L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals // *IEEE Transaction on Power System*. – 1990. – Vol. 5. – No. 1. – Pp. 80-89.

5. Huang N.E., Wu M.L.C., Long S.R., Shen S.S.P., Qu W., Gloersen P., Fan K.L. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis // *Proc. of the Royal Soc. Lond. A*. – 2003. – Vol. 459. – Pp. 2317-2345.

6. Jakpattanajit C., Hoonchareon N., Yokoyama A. On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems // *Journal of International Council on Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 1. – No 3. – Pp. 352-358.

7. Kyrylenko O., Butkevych O., Chyzhevskyi V. Monitoring of operational parameters of interconnected Power Systems // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2012. – No 3a. – Pp. 25-27.

8. Lee J.-H., Kim H.-T. Natural frequency extraction using generalized pencil-of-function method and transient response reconstruction // *Progress In Electromagnetics Research C*. – 2008. – Vol. 4. – Pp. 65-84.

9. Machowski J., Bialek J.W., Bumby J.R. *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd Edition. – John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 629 p.

10. Schweitzer E.O.; Whitehead D.E. Real-Time Power System Control Using Synchrophasors // 2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers. 1-3 April 2008. – Pp. 78-88. [Online]. Available at:

<http://140.98.202.196/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4515048&url=http%3A%2F%2F140.98.202.196%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D4515048>

Надійшла 13.04.2015