Из графика видно, что наименьший размер частиц соответствует наибольшей плотности. Это объясняется тем, что мелкие частицы более равномерно распределены по всему объёму и меньше подвержены агломерации.

VI. Выводы и заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что внесение наночастиц изменяет теплофизические свойства носителя. Плотность суспензии тем выше, чем больше концентрация частиц, добавленных к основной жидкости. Коэффициент теплоотдачи для таких жидкостей будет существенно выше, чем у чистых. Также было установлено, что размеры частиц влияют на плотность суспензии.

Список литературы

- 1. Михайлов А. Г, Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Процессы теплообмена в объеме жаротрубного котла с неводяным теплоносителем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 37–40.
- 2. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 73–78.
- 3. Бардаханов С. П., Новопашин С. А., Серебрякова М. А. Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. № 3 (1). С. 27–33.
 - 4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомёл А. С. Теплопередача: учебник. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
- 5. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. В. физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика.2016. Т. 19, № І. С. 75–83.

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОДСИНХРОННОГО РЕЗОНАНСА

Д. В. Рысев, П. В. Рысев

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. Рассматривается влияние уровня продольной компенсации линии электропередачи на возникновение и развитие явления электромеханического резонанса в турбогенераторе при самоустраняющемся коротком замыкании в нагрузке. Показано моделирование энергосистемы. Показана зависимость амплитуды крутильных колебаний в многомассовой модели турбоагрегата при изменении уровня продольной компенсации. Явление подсинхронного резонанса возможно в изолированных энергосистемах с нелинейной нагрузкой и продольной компенсацией. Цель исследования — выявить зависимость амплитуды колебаний в механической части турбогенератора от уровня продольной компенсации.

Ключевые слова: подсинхронный резонанс, турбогенератор, крутильные колебания.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-93-98

І. Введение

Развитие технологии передачи электрической энергии привело к созданию устройств продольной компенсации — систем, позволяющих компенсировать потребляемую реактивную мощность за счет ее выработки. Подобная компенсация повышает коэффициент мощности и увеличивает пропускную способность линий электропередачи. Однако, при определенном сочетании типа и мощности электростанции, вида и мощности нагрузки, уровня компенсации и наличия возмущений в системе возможно возникновение нежелательных режимов, приводящих к скручиванию элементов многомассовой системы электростанции. Такая ситуация подробно описывалась как в зарубежных [1] — [4], так и в отечественных источниках [5], [6].

Целью данной статьи является моделирование подсинхронного резонанса в турбогенераторе при изменении уровня продольной компенсации.

ІІ. Постановка задачи

Таким образом, задача исследования сводится к моделированию энергосистемы, содержащей турбогенератор, линию электропередачи, нагрузку и устройства продольной емкостной компенсации при внешнем воз-

мущении в виде короткого замыкания и изменении уровня компенсации. В качестве программы для моделирования подходит пакет MATLAB. Модель энергосистемы – модифицированная IEEE Second Benchmark [7].

III. ТЕОРИЯ

Структурная модель энергосистемы изображена на рис. 1. Предметом исследования выступают скручивающие моменты между элементами турбины, которые проявляются при появлении внешнего возмущения.

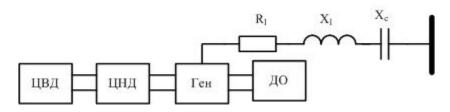


Рис. 1. Схема энергосистемы

Уравнения, описывающие многомассовую модель турбогенератора, представлены в [8] и скорректированы под текущую модель (1)-(13)

$$\begin{split} & - (X_1 + X_d) \frac{di_d}{dt} + X_{md} \frac{di_f}{dt} + X_{md} \frac{di_D}{dt} = \\ & = \omega_b \Big[(R_1 + R_a) i_d - (X_1 + \omega_r X_q) i_q + \omega_r X_{rnq} i_Q + e_{cd} + \upsilon_0 \sin \delta_r \Big] \end{split} \tag{1}$$

$$\begin{split} &-(X_1+X_q)\frac{di_q}{dt}+X_{mq}\frac{di_Q}{dt}=\\ &=\omega_b\Big[(X_1+\omega_rX_d)i_d+(R_1+R_a)i_q-\omega_rX_{rnq}i_f+\omega_rX_{md}i_D+e_{cq}+\upsilon_0\cos\delta_r\Big] \end{split} \tag{2}$$

$$-X_{md}\frac{di_{d}}{dt} + X_{f}\frac{di_{f}}{dt} + X_{md}\frac{di_{D}}{dt} = \omega_{b} \left[-R_{f}i_{f} + \frac{R_{f}E_{fd}}{X_{md}} \right]$$
(3)

$$-X_{mq}\frac{di_{q}}{dt} + X_{Q}\frac{di_{Q}}{dt} = -\omega_{b}R_{Q}i_{Q}$$
 (4)

$$-X_{\text{md}}\frac{di_{d}}{dt} + X_{\text{md}}\frac{di_{f}}{dt} + X_{D}\frac{di_{D}}{dt} = -\omega_{b}R_{D}i_{D}, \qquad (5)$$

где $v_f = R_f E_{ed}/X_{md}$.

Падение напряжения на X_c :

$$\frac{d\mathbf{e}_{cd}}{dt} = \omega_{b}(\mathbf{X}_{c}\mathbf{i}_{d} + \mathbf{e}_{cq}) \tag{6}$$

$$\frac{de_{cq}}{dt} = \omega_b(X_c i_q - e_{cd}) \tag{7}$$

Цилиндр высокого давления

$$\frac{d\omega_{1}}{dt} = \frac{1}{M_{1}} \left[-D_{1}(\omega_{1} - 1) - K_{12}(\theta_{1} - \theta_{2}) \right]$$
 (8)

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_b(\omega_1 - 1) \tag{9}$$

Цилиндр низкого давления

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{M_2} \left[-D_2(\omega_2 - 1) + K_{12}(\theta_1 - \theta_2) - K_{23}(\theta_2 - \delta_r) \right]$$
 (10)

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_b(\omega_2 - 1) \tag{11}$$

Генератор

$$\frac{d\omega_{r}}{dt} = \frac{1}{M_{3}} \left[T_{m} - T_{e} + K_{23}(\theta_{2} - \delta_{r}) - D_{r}(\omega_{r} - 1) \right]$$
 (12)

$$\frac{d\delta_{\rm r}}{dt} = \omega_{\rm b}(\omega_{\rm r} - 1) \tag{13}$$

где $T_e{=}i_q\psi_d$ - $i_d\psi_q{=}(X_q{\,-}X_d{\,})i_d\,i_q{\,+}X_{md}\,i_fi_q{\,-}X_{mq}\,i_Q\,i_d{\,+}X_{md}\,i_D\,i_q$

Уравнения (1) — (13) образуют систему 13 нелинейных ОДУ первого порядка, описывающих работу энергосистемы, со следующими переменными: i_d , i_q , i_f , i_Q , i_D , e_{cd} , e_{cq} , ω_I , θ_I , ω_2 , θ_2 , ω_r , δ_r

Электрические параметры генератора и линии (в о.е.): X_{md} =1.57, X_d =1.65, X_q =1.59, X_f =1.61, X_{mq} =1.53, X_D =1.41, X_O =1.39, R_f =0.012, R_D =0.0029, R_a =0.0045, X_l =0.21, R_l =0.0173, R_O =0.0024.

Механические параметры системы (в о.е.): D_1 =0.3104, D_2 =0.05, M_1 =1.55, M_2 =0.249, M_3 =0.031, K_{12} =83.47, K_{23} =42.702.

Управляющие параметры: T_m , E_{fd} , v_0 , $\mu = X_c/X_l$.

IV. Результаты экспериментов

На рис. 2 изображена модель энергосистемы, построенная в программе MATLAB. Эксперимент заключался в моделировании энергосистемы при различных уровнях компенсации реактивной мощности и анализе полученных результатов. В ходе исследования были получены осциллограммы токов короткого замыкания (рис. 3), отклонений угловых скоростей (рис. 4), моментов скручивания (рис. 5, 6, 7), и построена зависимость амплитуд скручивающих моментов от уровня продольной компенсации (рис. 8).

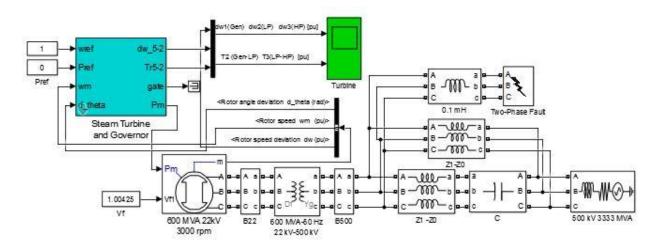


Рис. 2. Модель исследуемой энергосистемы в MATLAB Simulink

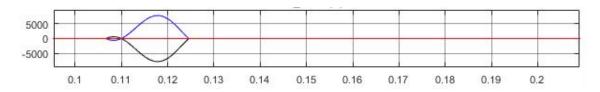


Рис. 3. Токи короткого замыкания

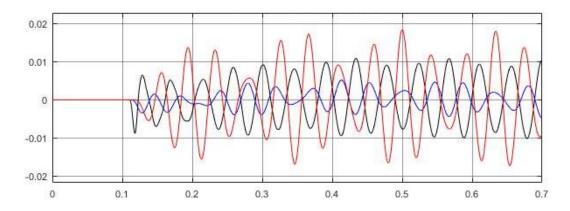


Рис. 4. Отклонения угловых скоростей при μ = 47%

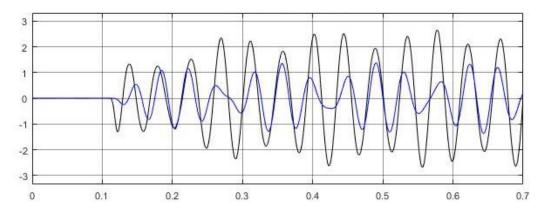


Рис. 5. Скручивающие моменты при $\mu = 47\%$

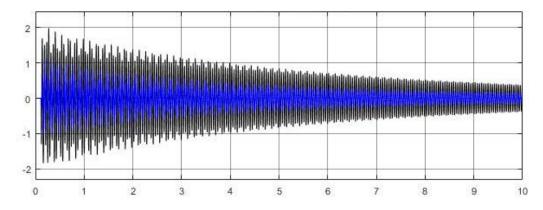


Рис. 6. Скручивающие моменты при $\mu = 40\%$

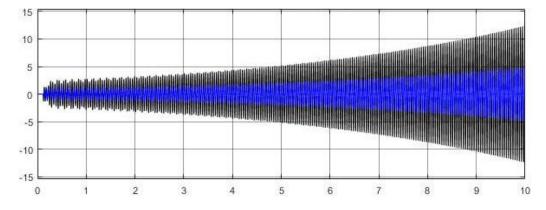


Рис. 7. Скручивающие моменты при μ = 47%

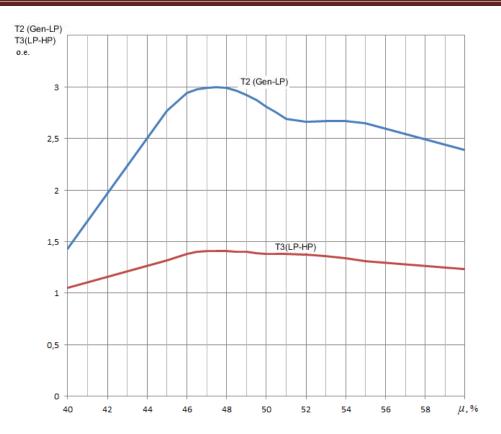


Рис. 8. Зависимость амплитуд скручивающих моментов от уровня продольной компенсации

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных графиков видно, что внешние возмущения в энергосистеме приводят к появлению сложных непериодических колебаний в турбине, которые слабо затухают при одном значении емкости продольной компенсации и возрастают при другом. На рис. 8 показана зависимость, свидетельствующая о том, что связь уровня продольной компенсации с амплитудами скручивающих моментов нелинейна и имеет свой максимум. При значениях уровня продольной компенсации от 44 до 55 % колебания в механической части турбогенератора не затухают, что является примером неустойчивого движения.

VI. Выводы и заключение

Модель энергосистемы позволяет оценить влияние компенсации на устойчивость работы энергосистемы при наличии внешнего возмущения. Стоит отметить узкий диапазон уровня продольной компенсации, при котором колебания в механической части турбогенератора возрастают во времени. Полученные в ходе моделирования графики повышают объем знаний о подсинхронном резонансе в энергосистеме, содержащей турбогенератор и устройства продольной компенсации.

Список литературы

- 1. Walker D. N., Bowler C. E., Jackson R. L., Hodges D. A. Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave // IEEE Trans. on PAS, Sep./Oct. 1975. P. 1878–1889.
- 2. Larsen E. V., Baker D. H. Series Compensation Operating Limits- a New Concept For Subsynchronous Resonance Stability Analysis's // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Sept/Oct 1980. Vol. PAS-99, no. 5. P. 1855–1863.
- 3. Pilotto L. A., Bianco A., Long W. F., Edris A. Impact of TCSC Control Methodologies on Subsynchronous Oscillations // IEEE Transactions on Power Delivery, January 2003.Vol. 18, no. 1. P. 243–252.
- 4. Nayfeh A. H., Harb A. M., Chin C. M., Hamdan A. M. A. Mili L. Application of Bifurcation Theory to Subsynchronous Resonance in Power Systems // International Journal of Bifurcation and Chaos. 1998. № 8(1). P. 157–172.
- 5. Belyaev A. N., Smolovik S. V. An Improvement of AC Electrical Energy Transmission System with Series Compensation by Implementation of Controllable Shunt Reactors // IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26 2003, Bologna, Italy.

- 6. Беляев А. Н. Снижение скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов автономной электростанции // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 2. С. 124–132.
- 7. IEEE Sub-synchronous resonance working group. Second benchmark model for computer simulation of sub-synchronous resonance // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1985. Vol. PAS 104, no. 5. P. 1057–1066.
- 8. Федоров В. К., Рысев Д. В. Устойчивость энергосистемы турбина генератор нагрузка при возникновении электромеханического резонанса // Омский научный вестник. 2011. № 3(103). С. 194–198.

УДК 621.316.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ABTOMATИКИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ DIGSILENT POWERFACTORY

А. В. Симаков¹, О. А. Лысенко², М. Ю. Чернев³ ¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ³РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье представлены принципы моделирования устройств релейной защиты и автоматики в программном обеспечении. Целью работы являлось создание модели устройства автоматического ввода резерва (ABP) с пуском по напряжению и проверка корректности его работы. Построение модели выполнено в программном обеспечении DigSILENT PowerFactory. В ходе работы описаны принципы функционирования ABP, выполнено построение математической модели с помощью встроенных измерительных и логических блоков используемого программного обеспечения, осуществлен ввод уставок защиты и проверена корректность функционирования в статических и динамических режимах работы. Результатом работы является готовая математическая модель ABP для использования в последующем моделировании работы защит.

Ключевые слова: релейная защита, ABP, моделирование, PowerFactory.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-98-102

І. Введение

Развитие промышленных мощностей требует особого внимания к устройствам защиты и автоматики, обеспечивающим бесперебойность энергоснабжения потребителя и защищающим энергосистему и электрооборудования от ненормальных режимов работы [1–3].

Согласно правилам устройства установок, существуют 3 категории потребителей: I, II и III [4]. Для электроприемников I категории перерыв электроснабжения может повлечь за собой опасность для жизни людей или серьезный ущерб для производства, поэтому они должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых источников питания с допустимым перерывом их электроснабжения только на время автоматического восстановления питания.

Для электроприемников II категории перерыв электроснабжения приводит к менее существенному ущербу для производства, чем в предыдущем случае. Эту категорию электроприемников рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых источников питания с допустимым перерывом электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями специализированного персонала.

Электроприемники III категории – все остальные электроприемники, допустимый перерыв в их энергоснабжении не более суток.

В связи с отмеченным выше, особый интерес представляет надежность энергоснабжения потребителей первой категории, поэтому целью работы является моделирование устройства автоматического ввода резервного питания.

II. Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо определить принцип работы устройства автоматического ввода резерва, его функциональные, структурные и логические схемы. Также, следует выбрать программное обеспечение для моделирования, определить условия и уставки срабатывания защиты. Созданную модель устройства следует испытать при различных режимах работы и сделать заключение относительно его корректности.

Испытание производится на модели подстанции с одиночной секционированной системой шин, соединенных через секционный выключатель (рис. 1).