

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С СОБСТВЕННЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ ОТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова*

Рассмотрены вопросы динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при коротких замыканиях с последующим выходом на раздельную работу. Произведен анализ для условий систем электроснабжения ОАО «ММК». Получены предельные времена отключения коротких замыканий.

*Ключевые слова: динамическая устойчивость, системы электроснабжения, промышленные предприятия, короткое замыкание.*

Быстрые темпы развития собственной электроэнергетической базы крупных промышленных предприятий вызывают значительное усложнение установившихся и переходных эксплуатационных режимов и существенно расширяют круг задач, решаемых при управлении ими. Важным условием надежной работы собственных источников электроэнергии является устойчивость синхронных генераторов при параллельной и раздельной работе с энергосистемой. Задача обеспечения устойчивости при этом возлагается на диспетчерский персонал энергохозяйства предприятия.

Наиболее распространенным видом аварийных режимов, вызывающим нарушение устойчивости, следует считать короткие замыкания, которые в условиях заводской системы электроснабжения зачастую сопровождаются выходом участка сети с местной электростанцией на раздельную с энергосистемой работу. С целью предотвращения нарушения устойчивости диспетчерскому персоналу необходимо прогнозировать переходные режимы, вызванные такими аварийными ситуациями. Это требует разработки соответствующего программного обеспечения, поскольку которое используется на сегодняшний день, ориентировано на расчет режимов районных энергосистем и не позволяет учесть особенности систем электроснабжения промышленных предприятий, такие,

как малая электрическая удаленность генераторов друг относительно друга, соразмерность мощностей генераторов и нагрузок.

## 1. Основные теоретические положения

Для анализа динамической устойчивости в этом случае может быть использована комбинация метода последовательного эквивалентирования для расчета установившегося режима в фиксированный момент времени [1] и известного метода последовательных интервалов [2], используемого при расчете параметров режима вдоль оси времени для численного интегрирования дифференциальных уравнений движения, что позволяет учесть действие регулирующих устройств и регулирующего эффекта нагрузки при расчете переходных электромагнитных и электромеханических процессов [3-4].

Основными достоинствами сочетания указанных методов являются сведение расчета на каждом шаге к взаимодействию одномашинной системы (генератор, синхронный двигатель и т.д.) с эквивалентными характеристиками остальной части системы, полученными при расчете установившегося режима, а также исключение систематической погрешности, характерной для метода последовательных интервалов, так как эквивалентирование и разворачивание схемы выполняется на каждом интервале времени [1]. На текущем шаге производятся изменения параметров машины, а именно угла ротора, положения регулятора мощности турбины, параметров регулятора возбуждения; у электрических нагрузок изменяются их величины в соответствии со статическими или динамическими характеристиками. Измененные параметры режима машины на рассматриваемом интервале времени являются исходными данными для проведения расчета установившегося режима в конце интервала.

При работе системы электроснабжения раздельно с питающей энергосистемой её режим претерпевает существенные изменения. Небаланс ре-

---

Малафеев Алексей Вячеславович - к.т.н., доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; [mgtu@magtu.ru](mailto:mgtu@magtu.ru).

Буланова Ольга Викторовна - к.т.н., старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; [mgtu@magtu.ru](mailto:mgtu@magtu.ru).

Ротанова Юлия Николаевна - старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; [rotjuil720@mail.ru](mailto:rotjuil720@mail.ru).

активной мощности приводит к значительному изменению напряжения в выделившейся сети, величина которого зависит от действия регуляторов возбуждения синхронных генераторов и регулирующего эффекта нагрузки по напряжению. Вследствие возникающего небаланса вырабатываемой и потребляемой активной мощности (1), который в нормальном режиме ложится на узлы примыкания к энергосистеме, изменяется частота. Расчёт переходных режимов осложняется необходимостью учёта динамических характеристик систем регулирования скорости турбин и большой длительностью переходного процесса.

Уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом:

$$\Delta P = P_{\tau(0)} \frac{\omega_{(n-1)}}{\omega_{(0)}} - P_{\text{эм}(n)} + P_{\text{пар}(n)} - P_{\text{ас}\Sigma} - P_{\text{рег}(n)} - P_{\text{зн}} - P_{\text{т.ст}} - P_{\text{т.рот}}, \quad \text{О)}$$

где  $n$  – номер интервала,  $P_{\tau(0)}$  – мощность на валу турбины,  $\omega_{(n-1)}/\omega_{(0)}$  – отношение текущего значения скорости к начальному,  $P_{\text{эм}(n)}$  – электромагнитная мощность синхронной машины,  $P_{\text{пар}(n)}$  – мощность, учитывающая влияние парового объема турбины,  $P_{\text{рег}(n)}$  – мощность, учитывающая действие регулятора скорости паровой турбины,  $P_{\text{зн}}$  – знакопеременная тормозная мощность синхронной машины,  $P_{\text{т.ст}}$  – тормозная мощность, обусловленная потерями в статоре,  $P_{\text{т.рот}}$  – тормозная мощность, обусловленная потерями в роторе,  $P_{\text{ас}\Sigma}$  – мощность, которая характеризует взаимные асинхронные мощности синхронных генераторов друг относительно друга в выделившемся участке сети.

$$P_{\text{ас}\Sigma} = P_{\text{ас}(12)} + P_{\text{ас}(13)} + \dots + P_{\text{ас}(1m)},$$

где  $m$  – число генераторов в выделившейся сети.

$$P_{\text{ас.12}} = - \left( \frac{U^2}{2} \cdot \frac{P_2}{\sum P} \right) \left( \left( \frac{s_{12} T_d'}{1 + s_{12}^2 T_d'^2} \right) \left( \frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) + \left( \frac{s_{12} T_d''}{1 + s_{12}^2 T_d''^2} \right) \left( \frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d} \right) + \left( \frac{s_{12} T_d'}{1 + s_{12}^2 T_d'^2} \right) \left( \frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \right), \quad (2),$$

где  $U$  – напряжение на выводах машины,  $s_{12} = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_2$  – взаимное скольжение;  $\omega_1, \omega_2$  – скорости текущего генератора и генератора, относительно которого определяется асинхронная мощность соответственно.

Новое установившееся значение частоты по окончании переходного процесса будет определяться работой первичных регуляторов скорости турбин и видом динамических характеристик комплексной нагрузки [5].

Такой алгоритм позволит определять параметры переходных режимов при коротких замыканиях с последующим выходом на раздельную работу, а также при коротких замыканиях, имеющих место в автономной сети.

## 2. Характеристика объекта исследования

Решение такой задачи актуально в условиях Магнитогорского промышленного узла, энергетика которого в последние годы получила существенное развитие. Введены дополнительные мощности на крупных электростанциях ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС, суммарная мощность которых достигла 630 МВт, построены новые электростанции в районах крупных технологических цехов. Получили дальнейшее развитие распределительные сети ПОВ, введены в действие крупные потребители электроэнергии в сталеплавильном и прокатном производстве, сооружается новый крупный потребитель – листопркатный стан «5000» горячей прокатки. Все эти мероприятия приводят к усложнению распределительных сетей, росту потоков мощности, увеличению токов короткого замыкания и вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Для обеспечения надёжной и эффективной работы узлов с собственными электростанциями за счет повышения устойчивости на основе предложенного алгоритма разработано специализированное программное обеспечение, ориентированное на анализ динамической устойчивости генераторов и двигателей собственных нужд электростанций при коротких замыканиях с учетом изменения конфигурации схемы вплоть до ее полного отделения от энергосистемы. Программа позволяет учитывать динамические характеристики комплексной нагрузки в зависимости от состава потребителей, динамические характеристики отдельных крупных электроприемников, самозапуск высоковольтных синхронных и асинхронных двигателей [4].

## 3. Результаты расчета

Рассмотрим режим короткого замыкания с последующим выходом на раздельную работу узла ТЭЦ. На рис. 1 приведены кривые изменения взаимных углов роторов генераторов, из которых видно, что наименее устойчивыми генераторами являются ТГ-5,6, работающие по блочной схеме, в связи со своей электрической приближенностью к точке короткого замыкания. На рис. 2, 3 в качестве примера приведены кривые изменения асинхронной мощности и скорости ТГ-5, из которых видно, что генераторы стремятся к новому установившемуся режиму.

При анализе различных режимов выхода на раздельную работу собственных электростанций было определено, что предельное время отключения короткого замыкания на шинах 110 кВ ТЭЦ составляет 0,4-0,6 с. Так как узел является избыточным по активной и реактивной мощности, в нем наблюдается повышение частоты до 50,023 Гц и напряжения до 123,3 кВ. Для узла ЦЭС-ПВЭС предельное время -

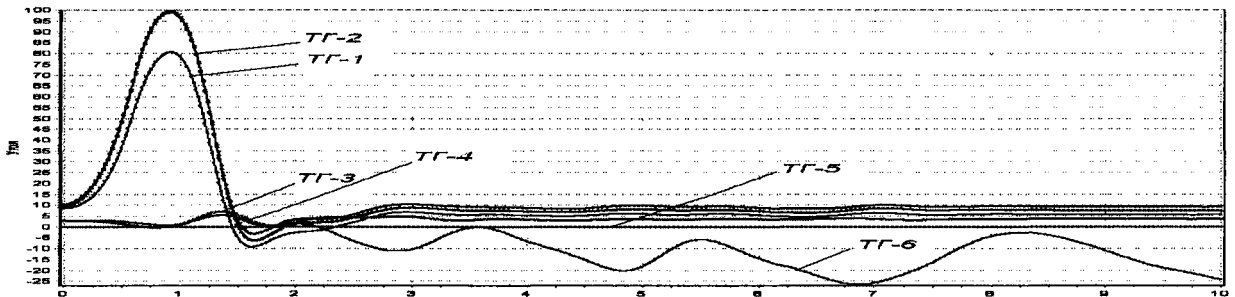


Рис. 1. Взаимные углы роторов генераторов ТЭЦ ОАО «ММК» относительно ТГ-5

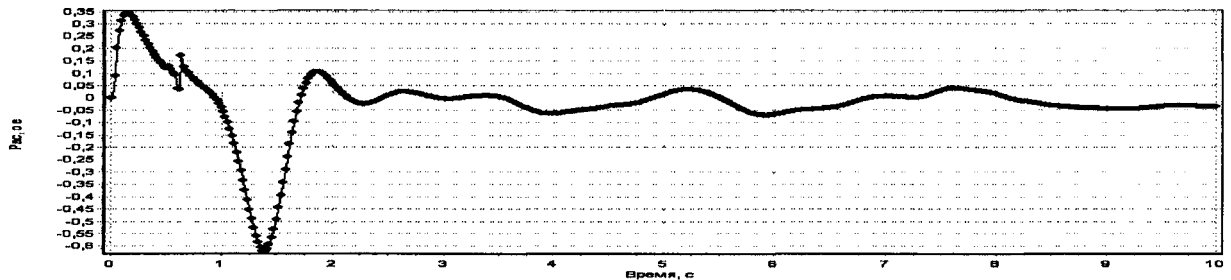


Рис. 2. Изменение асинхронной мощности ТГ-5

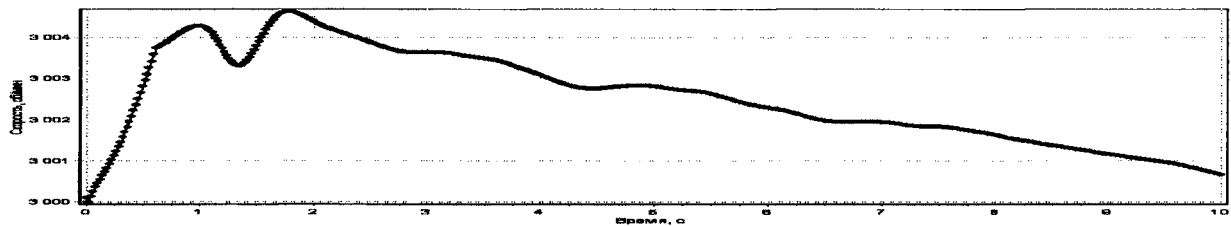


Рис. 3. Изменение скорости ТГ-5

0,1-0,4 с, значения частоты и напряжения достигают 50 Гц и 115 кВ соответственно.

### Заключение

В ходе разработки программы было установлено, что учет асинхронной мощности при расчете режимов систем электроснабжения промышленных предприятий (2) при раздельной с энергосистемой работе является определяющим, так как возникающий асинхронный момент позволяет генераторам достигнуть нового установившегося режима с новым значением частоты.

В созданном программном обеспечении есть возможность исследования следующих разновидностей режимов после короткого замыкания: ликвидация короткого замыкания за счет отключения элемента сети с сохранением параллельной работы, ликвидация короткого замыкания с отделением от энергосистемы и последующим восстановлением в результате действия релейной защиты и противоаварийной автоматики, исследование режима короткого замыкания в выделенной сети.

### Литература

1. Игуменцев, В. А. Расчет установившегося режима системы электроснабжения промышленного предприятия методом последовательного эквивалентирования / В. А. Игуменцев, И. А. Саламатов, Ю. П. Коваленко // *Электричество*. — 1986. - №8. - С. 7-12.

2. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости энергетических систем / П. С. Жданов; под ред. Л. А. Жукова. - М.: Энергия, 1979. - 456 с.

3. Игуменцев, В. А. Расчет установившегося режима в задачах диспетчерского управления системой электроснабжения усовершенствованным методом последовательного эквивалентирования / В. А. Игуменцев, А. В. Малафеев, В. В. Зиновьев // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. - 2006. - №3.

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007611306. «Расчет и оптимизация установившихся и переходных эксплуатационных режимов параллельной и раздельной работы с энергосистемой и режимов замыкания на землю с оценкой влияния на электрооборудование в системах электроснабжения промышленных предприятий» / В. А. Игуменцев, В. В. Зиновьев, А. В. Малафеев, О. В. Буланова // *Программы для ЭВМ, базы данных, ТИМС-М.*: ФИПС, 2007. - Ж.

5. Ротанова, Ю. Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий на примере ОАО «ММК» при трехфазных коротких замыканиях с учетом динамических характеристик нагрузки / Ю. Н. Ротанова // *Сб. докл. Международной научно-технической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии»*, Липецк, 2007. — С. 44-50.

Поступила в редакцию 31 января 2008 г.