

6. Шакарян, Ю.Г. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России. /Ю.Г. Шакарян. – Москва: открытое акционерное общество «федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2009. – 35 с.
7. Хромов электро: сайт. – Красногорск, 2005-2022. – URL: <https://khomovelectro.ru> (дата обращения: 09.11.2022).

Научный руководитель: к.т.н Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.А. Боргояков
Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Одной из важнейших целей электроэнергетики является обеспечение надежности электроснабжения потребителей электроэнергии. Электроэнергетическая система (ЭЭС) должна обеспечивать бесперебойное питание потребителей качественной электроэнергией. Для достижения этой цели энергосистема должна быть устойчива к различным видам оказываемых на нее возмущений. Для оценки поведения энергосистемы при различных возмущениях, были введены понятия статической и динамической устойчивости. В данной работе будет подробнее рассмотрена именно динамическая устойчивость, так как ее нарушение может привести к тяжелым последствиям.

Динамическая устойчивость – это способность электроэнергетической системы, после сильного возмущения, вернуться в установившийся режим, при котором ее параметры возвращаются к нормальным значениям или допустимым для эксплуатации [1]. Сильным возмущением считается короткое замыкание, отключение или включение большого генерирующего оборудования, нагрузки, линии электропередач или трансформатора [1]. Эти факторы приводят к резкому изменению режима работы энергосистемы, которое проявляется в значительных отклонениях параметров от нормальных [1]. Получается, что динамическая устойчивость важна для энергосистемы, ведь если система не вернется после какой-либо аварии в устойчивое состояние, то это может привести к тяжелым последствиям и экономическим потерям, а самое главное, будет нарушена надежность электроснабжения потребителей.

В рамках современных тенденций развития ЭЭС происходит существенное изменение процессов, связанных с динамической устойчивостью. Одним из перспективных направлений развития электроэнергетики в мире является внедрение современных способов генерации электроэнергии, а именно использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Именно эта тенденция влияет на динамическую устойчивость энергосистемы, и иногда не в лучшую сторону. Данный тренд также характерен для ЭЭС России, в нее массово внедряется альтернативная энергетика, а именно солнечные и ветровые электростанции, и их доля с каждым годом возрастает и будет возрастать [2]. Данные генерирующие объекты подключаются к энергосистеме не напрямую, а с помощью силовых преобразователей, инверторов. Для объединенной энергетической системы (ОЭС) Сибири более свойственно внедрение солнечных электростанций (СЭС), и их доля выше, чем доля ветровых установок [3], в связи с этим, далее рассматриваем именно этот вид ВИЭ.

Солнечная электростанция – электростанция, которая преобразует солнечную радиацию в электроэнергию. Она состоит из солнечных панелей, которые и преобразуют энергию, цепей постоянного тока, а также преобразователя постоянного тока, который предназначен для управления режимом работы источника энергии для отбора его мощности в точке максимума

и согласования выходного напряжения источника и инвертора. На рисунке 1 представлена структурная схема СЭС.



Рис. 1. Структурная схема СЭС

Основным функциональным узлом СЭС является инвертор, выполненный на базе силового преобразователя. Силовой преобразователь является связующим элементом между СЭС и энергосистемой, он отвечает за режимы работы СЭС. Инвертор выполняет функции преобразования напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока, согласует уровни напряжения источника с нагрузкой и энергосистемой с помощью трансформатора, а также стабилизирует напряжение при изменении нагрузки.

Традиционные электростанции имеют инерцию, которая замедляет изменение частоты сети. Чем выше эквивалентная инерция энергосистемы, тем медленнее изменяется ее частота. С введением в энергосистему солнечных электростанций общая инерция системы снижается, так как ни сама СЭС, ни силовой преобразователь не имеют инерции вращающихся масс, в связи с отсутствием вращающихся частей. Согласно формуле (1) [4], при увеличении мощности СЭС снижается эквивалентная инерция ЭЭС:

$$T_{J, \text{ЭЭС}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{J,i} \cdot S_i}{S_{\text{ЭЭС}}} \quad (1)$$

В результате внедрения ВИЭ значительно снижается надежность функционирования современных энергосистем в нормальных и особенно аварийных режимах при различного рода возмущениях, поскольку, помимо неоспоримых преимуществ, внедрение подобных объектов вызывает ряд проблем, связанных с обеспечением режимного и противоаварийного управления ЭЭС:

- увеличение скорости протекания переходных процессов по причине снижения общей постоянной инерции ЭЭС;
- снижение резервов мощности и отсутствие инерционного отклика при внедрении ВИЭ, что приводит к сложностям первичного и вторичного регулирования частоты;
- стохастический и резкопеременный характер выработки электроэнергии, связанный с непостоянством погодных явлений и др.

В подтверждение вышеуказанных пунктов, исследования [5] показывают, что внедрение СЭС в реальный энергорайон приводит к снижению динамической устойчивости.

Для повышения динамической устойчивости энергосистемы и снижения негативного воздействия ВИЭ, необходимо адаптировать их автоматические системы управления к требованиям традиционной энергетики. Одним из решений данной задачи является синтетическая инерция, которая достигается путем перепрограммирования силовых преобразователей ВИЭ таким образом, чтобы они имитировали инерцию вращающихся масс. То есть мы должны искусственно повысить инерцию энергосистемы, вследствие чего уменьшится скорость изменения частоты и повысится динамическая устойчивость. Это достигается регулированием отдачи в сеть мощности фотоэлектрических установок. Мы обеспечиваем резерв мощности с помощью разгрузки СЭС, то есть, не загружая ее на 100%, и ту мощность, которая остается, выдаем в сеть, синтетическая инерция позволяет нам повысить динамическую устойчивость. С ее помощью СЭС сможет изменять выдачу мощности в систему почти мгновенно, из-за отсутствия вращающейся массы [6]. Это позволит солнечным электростанциям регулировать выдачу мощности в сеть и подстраиваться под режим работы энергосистемы, а также участвовать в регулировании частоты.

Синтетическая инерция – это процесс управления дополнительной активной мощностью блока таким образом, чтобы она была пропорциональна скорости изменения частоты на выходе этого блока [7]. Наиболее часто используемыми схемами синтетической инерции являются одноконтурная и двухконтурная схемы. Отличие одноконтурной схемы от двухконтурной состоит в том, что в первой активная мощность пропорциональна только скорости изменения частоты, когда вторая дополнительно учитывает отклонение частоты [8]. На рисунке 2 представлена одноконтурная схема синтетической инерции [9].

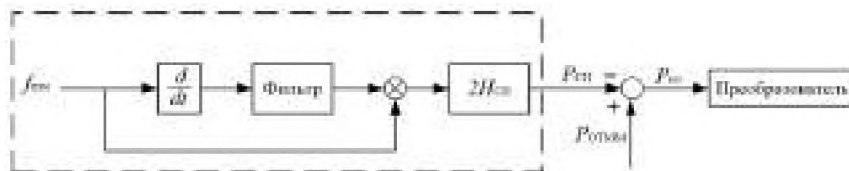


Рис. 2. Одноконтурная схема синтетической инерции

Синтетически инерционная активная мощность $P_{СИ}$ вносится дополнительным контуром управления, она пропорциональна изменению скорости частоты системы $f_{изм}$ и постоянной синтетической инерции $H_{СИ}$, данная мощность рассчитывается согласно формуле (2) [8]:

$$P_{СИ} = 2H_{СИ} \cdot \frac{df_{изм}}{dt} \cdot f_{изм} \quad (2)$$

С учетом точки максимальной мощности $P_{ОТММ}$, на выходе получаем опорную мощность $P_{ОП}$, которую и нужно добавить, чтобы уменьшить изменение скорости частоты. Также рассмотрим двухконтурную схему синтетической инерции. На рисунке 3 представлена двухконтурная схема синтетической инерции [10].

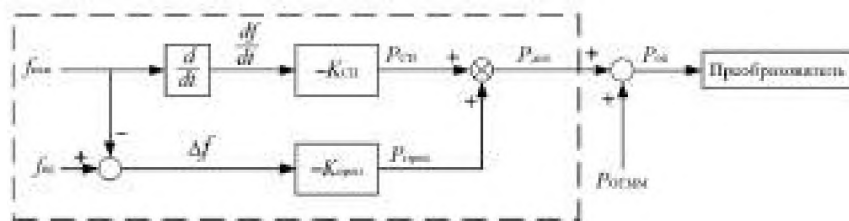


Рис. 3. Двухконтурная схема синтетической инерции

В данной схеме дополнительная активная мощность $P_{доп}$ определяется двумя контурами, то есть контуром изменения скорости частоты и контуром отклонения частоты, она рассчитывается согласно формуле (3) [8]:

$$P_{доп} = -K_{СИ} \frac{df_{изм}}{dt} - K_{проп} \Delta f \quad (3)$$

Синтетически инерционная активная мощность $P_{СИ}$ также пропорциональна измеренному изменению скорости частоты $f_{изм}$ и постоянно синтетической инерции $K_{СИ}$, но в дополнение к этому появилась пропорциональная мощность, которая пропорциональна отклонению Δf опорной частоты $f_{оп}$ и пропорциональной постоянной синтетической инерции $K_{проп}$.

Обе схемы позволяют участвовать СЭС в регулировании частоты, тем самым уменьшая изменение скорости частоты системы. Но в то же время, двухконтурная схема синтетической инерции включает в себя дополнительную мощность, которая пропорциональна отклонению частоты, что помогает более точно имитировать инерцию синхронных генераторов, а также гарантирует быстрое возвращение частоты сети к номинальным параметрам.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Калентионюк Е.В.: устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Изд-во Техноперспектива, 2008. – 375 с.

2. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению / П.В. Илюшин // Вестник МЭИ. Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии. – 2022. – №4. – С. 98–107.
3. Интерес инвесторов к теме ВИЭ в России сохраняется // Ассоциация развития возобновляемой энергетики. URL: <https://tredda.ru/information-bulletin-july2022> (дата обращения 10.11.2022).
4. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарлов, М.В. Андреев, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – №36.
5. Исследование влияния крупной СЭС на переходные процессы при возмущениях во внешней сети / К.А. Скурихина, М.Г. Тягунов, В.В. Чумаченко, А.В. Субботин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – №3(48). – С. 52–59.
6. Synthetic inertia and its role in improving grid stability // Current±. URL: <https://www.current-news.co.uk/blogs/synthetic-inertia-and-its-role-in-improving-grid-stability> (дата обращения 10.11.2022).
7. Synthetic inertia versus fast frequency response: a definition / R. Eriksson, N. Modig, K. Elkington // IET Renew Power Gener. – 2017. – V. 12. – P. 507-514.
8. Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review / Y. Cheng, R. Azizipanah-Abarghooee, S. Azizi, L. Ding, V. Terzija // Applied energy. – 2020. – V. 279.
9. Effects of inertia emulation in modern wind parks on isolated power systems // C. Rahmann, J. Jara, M. B. C. Salles / IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2015.
10. Frequency stability enhancement for low inertia systems using synthetic inertia of wind power // H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen, P. H. Jensen // Proceedings of 2017 IEEE PES General Meeting. – 2017. – P. 2–5.

Научный руководитель: к.т.н. А.А. Суворов, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРАКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

В.Д. Лощенков

Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Воздушные и кабельные линии электропередачи, имея большую протяженность, подвержены повреждениям в большей степени, чем другое электрическое оборудование. Особенно это относится к воздушным линиям, которые подвержены повреждениям от грозовых ударов, гололеда, сильного ветра, загрязнения изоляторов и т. п.

Неправильная работа релейной защиты является одной из главных причин крупных аварий в энергосистеме, поэтому поиск новых решений в области повышения надежности РЗА является актуальным на сегодняшний день. К ступеням дистанционной релейной защиты линии электропередачи, которая является основной защитой для линий 110-220 кВ, предъявляются высокие требования, в частности надежное распознавание аварийного режима и в то же время, необходимым требованием является несрабатывание на различные нагрузочные режимы и режимы качаний.

Актуальность данной работы заключается в том, что с развитием электроэнергетических систем связано постоянное совершенствование релейной защиты. Из-за повышения сложности электрических сетей, увеличением протяженности воздушных линий электропередачи и