

В результате можно сказать, что все уставки проходят по коэффициенту чувствительности, что позволяет установить данную защиту на реальный объект, то есть, на автотрансформаторы подстанции № 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 2008. – 252 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АЛГОРИТМЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЕРЦИЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

И.Н. Гусаров

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ31

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Введение

Источники возобновляемых источников энергии (ВИЭ) традиционно работают в режиме максимальной выдачи активной мощности в электросеть. Такая стратегия управления определяет функционирование ВИЭ в ведомом режиме относительно сети и ограничивает их возможность регулирования напряжения и частоты [1]. С уменьшением доли генерирующих установок, активно участвующих в регулировании частоты, наблюдается ухудшение общего инерционного отклика системы, а также сокращение резервов активной и реактивной мощности. Это, в свою очередь, снижает общую устойчивость сети. Кроме того, высокий процент ВИЭ в энергосистеме создает трудности для нормальной работы устройств релейной защиты и систем автоматического управления в аварийных ситуациях.

Таким образом, одной из ключевых задач в области электроэнергетики становится разработка системы автоматического управления (САУ) для инверторов, подключенных к ВИЭ. Эта система должна быть способна регулировать выдаваемую мощность, напряжение и частоту, а также перейти от ведомого режима к ведущему. Многие авторитетные научные группы [2–4] активно исследуют эту тему и рассматривают концепцию виртуального синхронного генератора (ВСГ) как одно из перспективных решений для устранения вышеупомянутых проблем.

Концепция ВСГ для инверторов ВИЭ

Концепция ВСГ заключается в воспроизведении характеристик и свойств реальной синхронной машины с помощью применения соответствующих уравнений и аппаратных решений в САУ инвертора. Это позволяет значительно повысить эффективность работы объектов ВИЭ в электрических сетях, а также улучшить их надежность как в обычных, так и в аварийных режимах.

Поскольку параметры алгоритма ВСГ не зависят от конкретных характеристик синхронной машины, это открывает широкие возможности для оптимизации алгоритмов управления силовыми преобразователями в различных схемах и режимах. Один из подходов к совершенствованию САУ ВСГ заключается в использовании адаптивных алгоритмов виртуальной инерции. В одной из работ [5] рассматривается возможность изменения момента инерции в

реальном времени с применением двухпозиционного управления. В другом исследовании авторы [6] изучают нелинейные изменения виртуальной инерции в зависимости от колебаний частоты сети. Также стоит упомянуть работу [7], в которой предложена сигмоидальная функция изменения виртуальной инерции в зависимости от частоты сети и скорости ее изменения.

Использование адаптивного изменения инерции при работе с алгоритмом ВСГ

Для адаптивного управления постоянной инерции необходимо выработать алгоритм изменения данного коэффициента в зависимости от частоты сети и характера ее изменения. Один из популярных алгоритмов изменения постоянной инерции представлен на рис. 1 совместно с табл. 1.

Таблица 1. Характер изменения постоянной инерции при изменении частоты

Интервал	$d\omega/dt$	$\Delta\omega$	$\Delta\omega \cdot d\omega/dt$	Характер T_j
1,5	>0	>0	>0	Увеличить
2,6	<0	>0	<0	Уменьшить
3,7	<0	<0	>0	Увеличить
4,8	>0	<0	<0	Уменьшить

Предложенный метод широко используется в двухпозиционном управлении и подробно описан в источнике [5]. Тем не менее, дискретное управление виртуальной постоянной инерции имеет свои ограничения, среди которых выделяется зона нечувствительности. Чтобы минимизировать частоту переключений в установившемся режиме, в данный алгоритм вводится задержка управляющих сигналов. Однако при резких изменениях частоты такая задержка может привести к недостаточной реакции алгоритма в критические моменты, что может вызвать превышение предельно допустимого значения частоты, установленного стандартами и другими нормативными документами.

Учитывая вышеупомянутые проблемы, алгоритм, рассматриваемый в данной работе, предполагает нелинейное изменение постоянной инерции виртуальной системы генерации на основе нейросетевых подходов. В то же время основные принципы управления инерцией остаются неизменными и представлены в табл. 1.

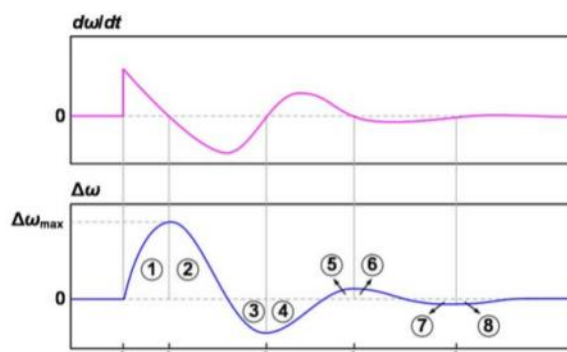


Рис. 1. Процесс изменения частоты при переходном процессе

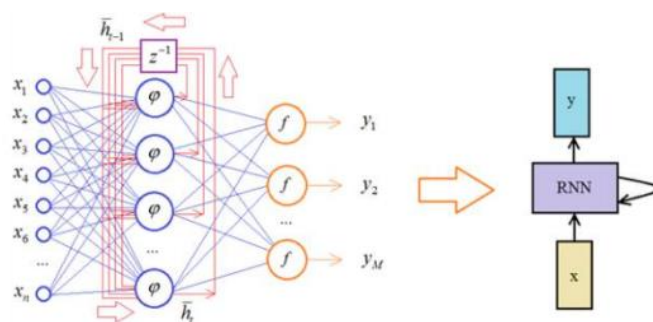


Рис. 2. Структура сети RNN

Структура нейронной сети для управления постоянной инерции ВСГ

Для данного исследования была выбрана нейронная сеть с рекуррентной обратной связью (RNN). Структурная схема работы сети представлена на рис. 2.

Структура данной сети очень схожа со структурой перцептрона, но ключевым отличием является наличие в скрытом слое обратной связи, имеющей задержку в один такт. Рекуррентная связь промежуточного слоя в НС обеспечивает влияние предшествующего такта на выходной ответ нейронной сети. Данное улучшение позволяет учесть в выходном слое НС не только входные параметры, но и предшествующие.

Изначально, для начала работы НС, подаются значения рекуррентного слоя h_0 , где данный вектор представлен нулевой матрицей (1):

$$h_0 = [0, 0, 0 \dots 0_N]^T. \quad (1)$$

Также на входной слой подается вектор значений x_1 . В данной работе этим вектором являются значения частоты сети и значения скорости изменения частоты в начальный момент времени (2):

$$x_1 = [\Delta\omega_1, d\omega_1]. \quad (2)$$

Дальше значения проходят через матрицу весовых коэффициентов W_{11} , образуя промежуточный или скрытый слой. Затем значения поступают на два входа. Один представляет из себя рекуррентный вектор h_1 , другой является связью скрытого слоя и выходного. В результате работы единичной итерации RNN на выходе имеется вектор выходного слоя y_1 , представленный значением постоянной инерции, и рекуррентный вектор h_1 , необходимый для дальнейшей итерационной работы сети.

Анализ работы НС при изменениях частоты сети

В ходе исследования был проведен ряд экспериментов по оптимальному управлению постоянной инерции ВСГ при возмущениях в электрической сети с использованием программного комплекса PSCAD. Для репрезентативного отражения результатов исследования за основу была взята интегральная оценка качества переходного процесса [8], которая отражает, на сколько эффективно алгоритм управления справляется с поставленной задачей.

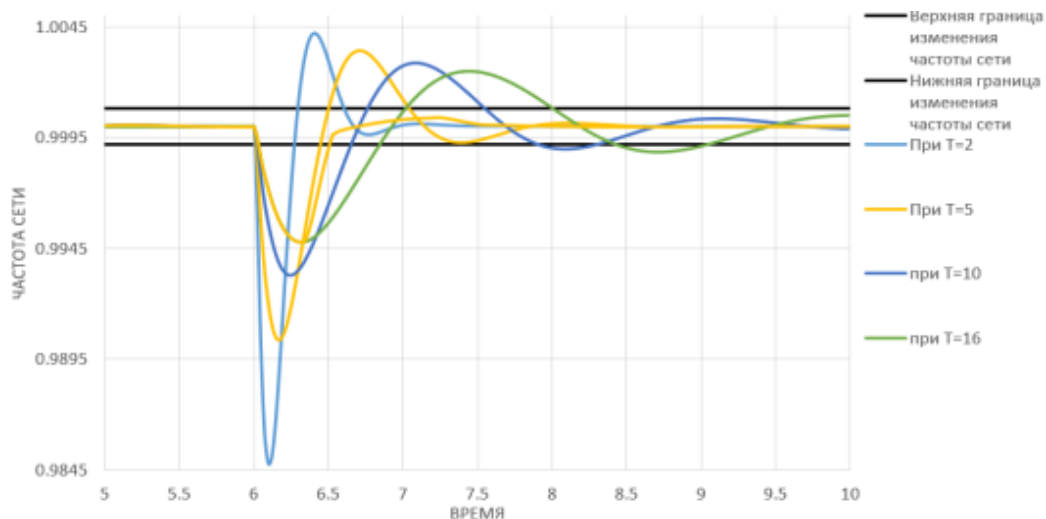


Рис. 3. Работа ВСГ с различными постоянными инерции при изменении нагрузки на 1.5 МВА

Таблица 2. Интегральная оценка качества переходных процессов

Момент инерции	$T_j=2$	$T_j=5$	$T_j=10$	$T_j=16$	Двухпозиционное управление	НС
$I = \int_{t_{нач}}^{t_{конеч}} x(t) \cdot dt$	0,337	0,399	0,489	0,543	0,214	0,175
$t_{регулирования}$	6,60	7,04	7,55	8,00	6,87	6,5

Заключение

Эволюция технологии ВСГ создает новые возможности для более глубокого интегрирования возобновляемых источников энергии в существующие энергетические системы и способствует переходу к распределенной энергетике. В настоящее время существует множество методов реализации алгоритмов управления, основанных на ВСГ, в рамках автоматизированных систем управления инверторами объектов возобновляемой энергетики.

Однако стоит подчеркнуть, что применение нейронной сети в алгоритмах управления на базе ВСГ не всегда является оптимальным решением по нескольким причинам. Прежде всего, для получения адекватных результатов от такой нейронной сети необходимо обучить ее на разнообразных репрезентативных переходных процессах, что может оказаться весьма сложным из-за широкого спектра возможных возмущений в электрической сети. Эта проблема может быть решена с помощью алгоритмов обучения без учителя или, например, с использованием методов машинного обучения с подкреплением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00004

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.Ю., Гусев А.С., К вопросу о современных принципах управления возобновляемыми источниками энергии на основе виртуального синхронного генератора // Вестник ПНИПУ – 2022. – № 41. – С. 5–30. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.1.01
2. Xianxu H.U.O. et al. Research on Frequency Stability Control for Micro-grid Based on Virtual Synchronous Generator // Modern Electric Power. – 2019. – Т. 36. – № 1. – С. 45–52.
3. D'Arco S., Suul J.A., Fosso O.B., A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids // Electr. Power Syst.Res. – 2015. – V. 122. – P. 180–197.
4. Zhong Q.C., Weiss G. Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. – IEEE, 2009.
5. B Hui Wang, Chengdong Yang, Xu Liao, Jiarui Wang, Weichao Zhou, Xiu Ji, Artificial neural network-based virtual synchronous generator dual droop control for microgrid systems. // Computers and Electrical Engineering. – 2023. – V. 111. – Part A.
6. Chen J., Liu M., Milano F., O'Donnell T. Adaptive Virtual Synchronous Generator Considering Converter and Storage Capacity Limits // CSEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2015. – V. 3. – No. 2. – P. 451–458.
7. Suvorov A., Askarov A., Ruban A., Rudnik V., Radko P., Achitaev., Suslov K. An Adaptive Inertia and Damping Control Strategy Based on Enhanced Virtual Synchronous Generator Model. – Mathematics. – 2023. – V. 11. – No. 18. – P. 3938. DOI:10.3390/math11183938.
8. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

АЛГОРИТМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ К СТАТИЧЕСКОМУ СИНХРОННОМУ КОМПЕНСАТОРУ (STATCOM)

И.В. Уманский

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А13*

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

Синхронизация фаз с напряжением сети переменного тока и измерение параметров прямой последовательности имеют большое значение для различных устройств, связанных с электронным оборудованием, подключенным к электросети, включая источники бесперебойного питания, фильтры активной мощности, системы преобразования возобновляемой энергии и устройства гибких систем передачи переменного тока (FACTS) [1].