

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А.С. Бердин, А.Н. Мойсейченков, П.Ю. Коваленко, М.Д. Сенюк, В.И. Мухин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Синхронный генератор является одним из основных элементов электроэнергетической системы, оказывающих существенное влияние на устойчивость и надёжность электроснабжения потребителей. В настоящее время задачи противоаварийного и режимного управления энергосистемами решаются на основе математических моделей, параметры которых задаются с помощью паспортных данных или данных, полученных при испытаниях. Высокая зависимость значений параметров математических моделей от внешних факторов ведёт к значительному снижению точности анализируемых процессов. Для повышения точности параметров математических моделей энергосистем применяются идентификация на основе измерений, полученных с помощью традиционных систем телеметрии или векторных измерений. Целью данной статьи является проведение метаанализа существующих исследований, направленных на разработку методики определения параметров синхронного генератора по данным измерений. Для достижения поставленной цели были проанализированы и сгруппированы как российские, так и зарубежные исследования. Затем для каждой группы были выявлены достоинства, недостатки, а также область применения. В результате было показано, что существующие методики определения параметров синхронных генераторов по данным измерений не способны подстраиваться к набору исходных данных, а также требуют значительных вычислительных мощностей. В качестве способа преодоления указанных недостатков предлагается адаптивная модель синхронной машины.

Ключевые слова: синхронный генератор, параметры схемы замещения, обзор исследований.

Введение

Одним из основных инструментов анализа установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) является математическое моделирование, основанное на схемах замещения основного силового оборудования: синхронных генераторов (СГ), линий электропередачи (ЛЭП), трансформаторов, двигателей и т. д. На текущий момент общепринятым подходом является определение параметров схем замещения по паспортным данным или данным испытаний. Данный подход имеет ряд недостатков, связанных с неучётом изменения параметров оборудования в процессе эксплуатации. Данное изменение может быть связано со старением узлов оборудования, влиянием внешних факторов, таких как температура окружающей среды, наличие наледи и т. д. Погрешности параметров схем замещения элементов ЭЭС неизбежно приводят к снижению точности анализа установившихся и переходных процессов. Наиболее сильное влияние на результаты расчётов режимов ЭЭС оказывает СГ, параметры которого могут изменяться в широких пределах: постоянная инерции, коэффициент демпфирования, а также сопротивление.

На сегодняшний день в ряде зарубежных и российских исследований предлагается определять параметры схемы замещения СГ по данным измерений. Данный подход позволяет перейти от паспортных данных к реальным параметрам СГ, что позволяет увеличить точность расчётов, а также предоставляет новые возможности оценки техни-

ческого состояния. Например, снижение коэффициента демпфирования может указывать на повреждение демпферной обмотки.

Настоящая работа посвящена анализу методов оценки параметров СГ на основе измерений. Приведены достоинства, недостатки, а также область применения рассмотренных методов. Результаты исследования сведены в таблицу.

Классификация методов определения параметров синхронного генератора

Первые работы, посвящённые определению параметров СГ, были опубликованы в 1931 и 1932 гг. [1, 2]. Данные исследования появились в связи с развитием теории синхронных машин, метода симметричных составляющих и, как следствие, введением большого количества новых переменных, значения которых было необходимо определить. В исследовании [1] представлены подходы для определения параметров СГ на основе известных магнитных потоков. Авторами работы было указано, что предложенные подходы могут быть использованы только для неявнополюсных СГ с двухслойной обмоткой. В отличие от теоретического подхода исследования [1], авторами работы [2] была разработана и проведена серия испытаний для определения параметров СГ. Однако, как отмечал P.L. Alger, разработанные серии испытаний требуют неоправданных затрат и особых мер безопасности при проведении опытов короткого замыкания при номинальном напряжении.

Развитие методов определения параметров СГ и накопление опыта проектирования и эксплуатации привели в 1995 г. к созданию стандарта [3], в котором подразумевается использование моделей СГ с заранее заданной структурой, основанной на системе уравнений Парка – Горева. Несмотря на высокую проработанность методов, можно выделить существенный недостаток: для определения параметров СГ в соответствии со стандартом [3] необходимо проводить ряд испытаний с отключением СГ от сети. Данный подход характеризуется высокими издержками и значительным временем отключенного состояния СГ.

Внедрение в последние 20 лет высокоточных систем измерения привело к созданию ряда исследований, в которых параметры СГ определяются по измерениям [4–44]. В данных работах структура модели СГ также жёстко зафиксирована, как и в стандарте [3].

Большинство исследований на тему определения параметров СГ с помощью измерений параметров электрического режима можно классифицировать следующим образом:

- 1) анализ уравнения движения СГ [4, 5];
- 2) цифровые фильтры [6–12];
- 3) преобразование Хартли [13];
- 4) метод наименьших квадратов [14–19];
- 5) методы искусственного интеллекта [20–31];
- 6) псевдослучайная двоичная последовательность [32, 33];
- 7) анализ переходных процессов при двухфазном КЗ [34] и пуске [35];
- 8) метод Ньютона [36–40];
- 9) метод активной идентификации [41];
- 10) анализ чувствительности [42–44].

Далее приводится описание каждого класса методов определения параметров СГ с указанием их достоинств и недостатков.

Анализ методов определения параметров СГ

Для анализа электромеханических переходных процессов в ЭЭС широкое применение нашло описание СГ с помощью уравнения движения, которое отражает второй закон Ньютона для вращающихся масс и содержит в себе постоянную времени СГ, коэффициент демпфирования, электромагнитную и механическую мощности.

Авторами исследований [4] и [5] разработан метод определения инерции СГ с помощью данных системы векторных измерений (СВИ) и применения линеаризации уравнения движения СГ. Данные методы применяются к сигналам токов и напряжений в условиях низкочастотных колебаний (НЧК). В численных примерах авторы показывают приемлемую точность и вычислительную простоту предлагаемых методов. Для определения параметров СГ в исследованиях [4] и [5] используются эквивалентирования схемы ЭЭС к виду

«СГ – СГ» в работе [4] и «СГ – шины бесконечной мощности (ШБМ)» в работе [5], что влечёт к накоплению погрешности при эквивалентировании кольцевых и параллельных участников сети. Кроме того, в исследованиях [4] и [5] не были учтены автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и ёмкостная проводимость линий. Также для применения предлагаемых методов необходимо наличие строго определённой схемно-режимной ситуации, характеризующейся НЧК.

Развитие СВИ, теории цифровой обработки сигналов (ЦОС), а также микропроцессорной техники привели к созданию класса алгоритмов, применяемых к сигналам ЭЭС. В частности, для задачи определения параметров СГ были применены фильтр Калмана [6–10] и цифровые фильтры [11, 12].

В работе [6] авторами был предложен метод определения параметров СГ на основе фильтра Калмана. Данный метод позволяет определить такие параметры СГ, как инерция, коэффициент демпфирования, переходное сопротивление по оси d . Явными преимуществами метода являются стойкость к зашумленным данным, возможность определения параметров АРВ и стабилизатора ЭЭС. Однако, как указывают сами авторы, предлагаемый метод не лишён и недостатков.

1. Для определения параметров СГ необходимы данные с различных возмущений ЭЭС, параметры, определённые для характерных режимов, могут существенно отличаться от текущих;

2. Предлагаемый метод не может определить ошибки в структуре модели.

Авторами исследования [12] предложен алгоритм для определения постоянной инерции на основе цифровых фильтров. Определение инерции основано на анализе сигналов активной мощности и частоты с помощью скользящих окон. С помощью численного примера авторами была показана высокая точность предлагаемого метода, однако можно выделить и явный недостаток: высокая вычислительная сложность определения коэффициентов фильтров, что делает невозможным применение в режиме реального времени.

Одним из основных методов теории ЦОС, применяемых для задач электроэнергетики, является преобразование Фурье, альтернативой которому является преобразование Хартли.

В работе [13] авторы предлагают использовать преобразование Хартли для определения параметров СГ в режиме реального времени. В качестве исходных данных выступают сигналы токов и напряжений СГ. Предлагаемый метод позволяет определить следующие параметры СГ: активное сопротивление статора, индуктивность по оси d и q , взаимную индуктивность между обмоткой возбуждения и фазной обмоткой. Для апробации авторами были использованы математически смоделированные данные с добавлением «белого шума». Авторы исследования указывают на значительную

чувствительность метода к шумам в исходных данных, ими было установлено, что применяемая погрешность метода обеспечивается при достижении коэффициента сигнал/шум 50 и выше.

Авторами работ [14–19] для определения параметров СГ предлагаются алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов (МНК).

В исследовании [14] авторами предлагается алгоритм, основанный на методе взвешенных наименьших квадратов для определения следующих параметров СГ: синхронные, переходные и сверхпереходные сопротивления, постоянные времени по осям d и q и постоянная инерции. В качестве исходных данных выступают сигналы токов и напряжений СГ. Авторами была показана высокая точность предложенного алгоритма, которая в значительной степени зависит от плотности первичной информации.

Под методами искусственного интеллекта (ИИ) понимается класс алгоритмов, которые моделируют поведение человеческого мозга, или группы низкоуровневых организмов: пчёл, муравьёв, роя частиц. Методы ИИ объединяют в себе статистический анализ, регрессию и классификацию. Различают следующие типы алгоритмов ИИ:

- 1) эволюционные алгоритмы: генетический алгоритм (ГА);
- 2) искусственные нейронные сети (ИНС);
- 3) эвристические алгоритмы – роя частиц и колонии муравьёв.

В работе [20] авторами предложен метод определения параметров СГ на основе ГА. Традиционный алгоритм ГА использует бинарное кодирование, однако авторами данного исследования была выдвинута и доказана гипотеза об увеличении точности ГА за счёт применения вещественного кодирования. В качестве входных данных были использованы векторы токов и напряжений СГ. В качестве искомым параметров выступили: синхронные, переходные и сверхпереходные сопротивления, постоянные времени по осям d и q . Для апробации разработанного метода были использованы смоделированные данные трёхфазного КЗ в системе «СГ – ШБМ». В результате было показано, что при использовании традиционного ГА с бинарным кодированием максимальная ошибка определения параметров СГ составляет 13,6 %, в то время как при использовании ГА с вещественным кодированием – 7,4 %. Также было показано, что минимум отклонения определяемых параметров от эталонных достигается за 0,6 с. Несмотря на высокую точность предлагаемого авторами метода, ими не была проведена апробация на сложноразветвленной модели с несколькими СГ и на данных с реальной ЭЭС.

Авторами исследования [27] представлен метод для определения параметров СГ в режиме реального времени с использованием ИНС в режиме электромеханического переходного процес-

са. Авторами были смоделированы 48 явнополусных СГ с их системами возбуждения с использованием паспортных данных, к смоделированным генераторам было применено возмущение в виде КЗ. В результате была сформирована обучающая выборка, которая состояла из сигналов токов и напряжений генераторов и паспортных данных синхронных, переходных и сверхпереходных сопротивлений, а также постоянных времени по осям d и q . На основании полученной выборки была обучена ИНС. Для апробации ИНС были использованы реальные сигналы токов и напряжений возмущения на ГЭС Карун-3. Результаты работы ИНС были сравнены с паспортными данными, было установлено, что отклонения вычисленных параметров от паспортных отклоняются от 0,5 до 29,2 %. Наибольшие отклонения соответствуют значениям синхронного сопротивления по оси q , сверхпереходному сопротивлению по оси q , а также сверхпереходной постоянной времени по оси q . Основным недостатком представленного исследования является малое число рассмотренных возмущений, а также использование паспортных данных, которые могут варьироваться в процессе эксплуатации в обучающей выборке.

В работе [29] для оценки параметров синхронного генератора была использована оптимизация методом колонии муравьёв. Традиционно в качестве исходных данных принимались значения токов и напряжений СГ, а в качестве искомым – синхронные, переходные, сверхпереходные сопротивления, постоянные времени по осям d и q , а также коэффициент демпфирования и постоянная инерции.

Авторами работы [30] предложен метод оценки параметров синхронного генератора на основе оптимизация методом роя частиц. В качестве исходных данных были выбраны сигналы токов и напряжений СГ, смоделированного в системе Simulink, режима КЗ. Для определения параметров СГ была использована классическая система уравнений Парка – Горьева. В результате авторами было определено, что ошибка определения параметров СГ варьируется в пределах от 0,2 до 5,3 %. Несмотря на высокую точность предлагаемого метода, в работе не было проведено исследование на реальных данных.

Под псевдослучайной двоичной последовательностью понимаются периодически повторяющиеся кодовые двоичные последовательности определённой длины, которые широко используются для передачи дискретных сигналов. Авторы исследований данного типа рассматривают сигналы токов и напряжений как псевдослучайную двоичную последовательность.

В работе [33] авторами для определения параметров СГ была применена псевдослучайная двоичная последовательность. В качестве объекта исследования были выбраны СГ с АРВ сильного действия, смоделированный в системе Simulink,

а также реальный СГ мощностью 3 кВА. Для определения параметров СГ была использована модель Heffron-Phillips. Для апробации предложенной методики был проведён ряд тестов, при этом точность идентификации параметров СГ определялась не с помощью сравнения с паспортными данными СГ, а с помощью восстановления исходных данных по вычисленным параметрам. Несмотря на высокую точность предложенного метода, его применение ограничено установившимся режимом СГ.

Авторы исследований [34, 35] использовали реальные данные режимов КЗ и пуска СГ для определения его параметров. Данный подход обладает значительно меньшими затратами по сравнению с определением параметров СГ в процессе испытаний, которые сопровождаются отключением СГ от сети.

В работе [34] предложен метод определения параметров СГ с помощью анализа формы кривых токов и напряжения при двухфазном КЗ. Анализ формы кривых проводился с помощью метода конечных элементов. Для апробации были выбраны данные с реального СГ в режиме двухфазного КЗ. В качестве определяемых параметров были выбраны сверхпереходные сопротивления по осям d и q . Далее был проведён анализ ошибки определения параметров СГ относительно паспортных данных. Полученные результаты указывают на высокую точность предлагаемого метода.

Исследование [35] посвящено оценке параметров СГ с помощью анализа переходного процесса, возникающего при его пуске. В качестве исходных данных выступают сигналы токов и напряжений СГ. Для определения параметров СГ авторы выполняют разложение исходных данных по осям d и q . Далее с помощью полученных проекций токов и напряжений по осям d и q находят синхронное, переходное и сверхпереходное сопротивления по осям d . Для апробации метода была использована модель СГ, в результате ошибка определения параметров варьируется от 0,1 до 7,3 %. Основной недостаток предложенного авторами метода связан с ограниченностью применения режимом пуска СГ.

Одним из классических методов оптимизации и решения нелинейных систем уравнений является метод Ньютона. Данный метод нашёл широкое применение для решения задач расчёта и оптимизации установившихся режимов ЭЭС. Авторами исследований [36–40] метод Ньютона был применён для определения параметров СГ.

В работе [40] авторами предложен алгоритм определения инерции СГ на основе МНК и метода Ньютона с использованием данных СВИ. Предлагаемый алгоритм выглядит следующим образом:

- 1) инициализация переменных;
- 2) расчёт динамического переходного процесса;
- 3) обновление значения постоянной инерции с помощью рекуррентного выражения;
- 4) обновление динамической модели;

5) определение собственных чисел матрицы Якоби;

6) вычисление значений целевой функции;

7) если итерационный процесс сошёлся, то завершить, если нет, то вернуться к пункту 2.

С помощью математического моделирования на базе 86-узловой схемы была показана высокая точность предлагаемого алгоритма.

Методы определения параметров СГ на основе метода Ньютона имеют общий недостаток, связанный с заданием начальных приближений, которые для практических задач могут быть неизвестны.

Под методами активной идентификации понимают совокупность методов для построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений. При идентификации динамическая модель может быть представлена в виде чёрного или серого ящика. Под чёрным ящиком понимается динамическая модель, для которой неизвестными являются структура и параметры, а для серого ящика – только параметры. При этом над исследуемой системой могут проводиться как пассивные, так и активные эксперименты.

Для определения параметров СГ в работе [41] был предложен метод активной идентификации в режиме реального времени. В предложенном методе все нелинейные элементы модели СГ заменяются на обратные связи. Затем по измерениям токов и напряжений СГ производится идентификация его параметров. Для апробации предлагаемого метода используются реальные данные СГ. Авторами исследования была показана высокая точность и низкая задержка предлагаемого метода. Одним из недостатков метода активной идентификации является необходимость выбора характерного режима, который должен определяться экспертным путём, для идентификации.

Под анализом чувствительности понимается оценка влияния параметров СГ на характер переходного процесса.

Авторами работы [42] был разработан метод оценки параметров синхронного генератора на основе теории чувствительности. Одно из достоинств данного подхода заключается в определении параметров СГ, находящегося под нагрузкой. В качестве тестовой модели был рассмотрен трёхфазный генератор с системой АРВ сильного действия, ЛЭП и ШБМ. В качестве определяемых параметров были выбраны постоянная инерция и синхронные сопротивления по осям d и q . Искомые параметры определялись на скользящих окнах размером от 2 до 3 секунд. Для определения точности искомых параметров было проанализировано отклонение вычисленной скорости СГ от эталонной. Несмотря на высокую точность предлагаемого метода, сами авторы указывают его недостаток, который отражается в недостаточном количестве определяемых параметров СГ, необходимых для комплексного моделирования.

Анализ методов определения параметров СГ

Метод	Режимные условия	Преимущества	Недостатки
Анализ уравнения движения СГ	НЧК	Вычислительная простота. Возможно применение в режиме реального времени	Неучёт автоматических регуляторов возбуждения, зарядной ёмкости линий электропередачи. Применение эквивалентирования ЭЭС
Цифровые фильтры	КЗ, НЧК	Стойкость к зашумленным данным. Возможность определения параметров АРВ и стабилизатора ЭЭС	Высокая вычислительная трудность определения коэффициентов фильтров. Невозможность применения в режиме реального времени
Преобразование Хартли	УР	Возможно применение в режиме реального времени	Высокая чувствительность к шумам в исходных данных
Метод наименьших квадратов	УР, КЗ, НЧК	Возможность использования в режиме реального времени при ограничении числа определяемых параметров СГ	Требуется высокая плотность первичных данных
Методы искусственного интеллекта	УР, КЗ, НЧК	Высокая адаптивность при условии достаточности обучающей выборки	Высокая зависимость результатов от структуры и параметров обучающей выборки. Возможность применения в режиме реального времени ограничена вариативностью обучающей выборки
Псевдослучайная двоичная последовательность	УР	Возможно применение в режиме реального времени	Область применения ограничена УР
Анализ переходных процессов при двухфазном КЗ и пуске СГ	КЗ, пуск СГ	Обладают меньшими затратами по сравнению с методами, требующими проведения испытаний СГ при отключении от сети	Ограниченная область применения КЗ и пуск СГ
Метод Ньютона	УР, КЗ, НЧК	Возможно применение в режиме реального времени	Устойчивость вычислительного процесса зависит от выбора начального приближения
Метод активной идентификации	КЗ, НЧК	Возможно применение в режиме реального времени. Высокая точность	Не формализован выбор характерных режимов для идентификации
Анализ чувствительности	КЗ, НЧК	Высокая точность	Малое количество определяемых параметров

Исходя из анализа, подставленного в таблице, можно сделать следующие выводы.

1. Не существует одного универсального метода определения параметров СГ.

2. Приведённые методы имеют жёсткие требования к набору входных параметров.

3. При разработке приведённых методов не рассматривался вопрос определения параметров групп СГ, эквивалентов ЭЭС и узлов двигательной нагрузки.

4. Ряд методов основан на достаточно полном представлении СГ, что делает невозможным применение в режиме реального времени.

С целью разработки общего «гибкого» подхода авторами работ [45] и [46] была предложена

адаптивная модель синхронной машины (СМ), которая характеризуется следующими свойствами.

1. Параметры модели определяются на основе измерений.

2. Структура модели определяется набором измеряемых параметров.

3. В основе модели лежат простые выражения, что предоставляет возможность использования в режиме реального времени.

4. С помощью адаптивной модели СМ возможно описать отдельный СГ, группу СГ, узел двигательной нагрузки, эквивалент ЭЭС.

5. В зависимости от задач точность и временная задержка получения параметров адаптивной СМ может быть изменена.

В качестве применения адаптивной модели СМ рассматриваются следующие задачи: оценки технического состояния СГ и ПАУ. Для задачи оценки технического состояния СГ высокую значимость приобретает точность получения параметров СГ, в то время как вычислительная нагрузка отходит на второй план. Задача ПАУ относится к задачам, для решения которых первостепенным является быстроедействие, а высокой точностью можно пренебречь.

Выводы

В представленном исследовании был проведён анализ ряда методов определения параметров СГ по данным измерений. Рассмотренные методы были найдены в исследованиях, проводимых в период с 2000 по 2019 гг. Все рассмотренные методы были сгруппированы на 10 классов, для каждого класса были выделены следующие характеристики: режимные применения, определяемые параметры СГ, достоинства и недостатки.

Было определено, что методами, позволяющими определить наибольшее количество параметров СГ, являются МНК, псевдослучайная двоичная последовательность, метод Ньютона и метод активной идентификации. Методом, позволяющим определить наименьшее количество параметров из рассмотренных, является анализ уравнения движения СГ.

Методами, позволяющими определить параметры СГ в широком диапазоне режимных ситуаций, являются МНК, метод ИИ и метод Ньютона.

Для методов анализа уравнения движения СГ, преобразования Хартли и псевдослучайной двоичной последовательности необходимы строго определённые режимные ситуации.

Для всех рассмотренных методов можно выделить как достоинства – высокую точность, возможность применения в режиме реального времени, стойкость к зашумлённым данным, вычислительную простоту, так и недостатки – малое количество определяемых параметров, ограниченную область применения, высокую адаптивность. Таким образом, однозначно выделить оптимальный метод для определения параметров СГ на сегодняшний день невозможно.

Отдельно стоит отметить методы ИИ, которые характеризуются высокой адаптивностью и точностью определения параметров СГ. Для данного класса методов ключевой является проблема формирования достаточной обучающей выборки. Для настройки алгоритма ИИ в обучающую выборку должен быть включён набор токов и напряжений для различных режимных ситуаций и вектор параметров СГ. Таким образом, метод ИИ не может рассматриваться как независимый, для его обучения необходимы параметры СГ, которые должны быть получены с помощью дополнительного метода.

Методом, позволяющим обобщить подходы, рассмотренные в данной работе, является адаптивная модель СМ, которая обладает высокой гибкостью по отношению как к исходным данным, так и к задачам, для решения которых она применяется.

Литература/References

1. Kilgore L.A. Calculation of synchronous machine constants. *AIEE Trans.*, 1931, vol. 50, pp. 1201–1214.
2. Wright S.H. Determination of synchronous machine constants by test. *AIEE Trans.*, 1931, vol. 50, pp. 1331–1351.
3. IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines Part I – Acceptance and Performance Testing Part II – Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis. *IEEE Std 115-1995*, 12 April 1996, pp. 1–198.
4. Chow J.H., Chakraborty A., Vanfretti L., Arcaç M. Estimation of Radial Power System Transfer Path Dynamic Parameters Using Synchronized Phasor Data. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 564–571. DOI: 10.1109/tpwrs.2008.919315
5. Fan L., Miao Z., Wehbe Y. Application of Dynamic State and Parameter Estimation Techniques on Real-World Data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 1133–1141. DOI: 10.1109/pes.2009.5275423
6. Huang Z., Du P., Kosterev D., Yang B. Application of extended Kalman filter techniques for dynamic model parameter calibration. *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, AB, 2009, pp. 1–8. DOI: 10.1109/pes.2009.5275423
7. Shakouri H., Malik O.P. Estimation of synchronous generator parameters using an adaptive parameter estimator. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, San Francisco, CA, 2005, vol. 3, pp. 2253–2258. DOI: 10.1109/pes.2005.1489096
8. Wehbe Y., Lingling Fan. UKF based estimation of synchronous generator electromechanical parameters from phasor measurements. *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, Champaign, IL, 2012, pp. 1–6. DOI: 10.1109/naps.2012.6336347
9. Nadarajan S., Bhangu B., Panda S.K., Gupta A.K. Comparing Extended Kalman Filter and Particle Filter for estimating field and damper bar currents in Brushless Wound Field Synchronous Generator for stator winding fault detection and diagnosis. *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, 2016, pp. 715–719. DOI: 10.1109/apec.2016.7467950

10. Miles A.G., Johnson B.K., Fischer N. Online Characterization of a Synchronous Generator Using an Unscented Kalman Filter. *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1485–1492. DOI: 10.1109/iemdc.2019.8785153
11. Valverde G., Kyriakides E., Heydt G.T., Terzija V. Nonlinear Estimation of Synchronous Machine Parameters Using Operating Data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 831–839, Sept. 2011. DOI: 10.1109/tec.2011.2141136
12. Wall P., Terzija V. Simultaneous Estimation of the Time of Disturbance and Inertia in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 2018–2031. DOI: 10.1109/tpwr.2014.2306062
13. Melgoza J.J.R., Heydt G.T., Keyhani A., Agrawal B.L., Selin D. Synchronous machine parameter estimation using the Hartley series. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2001, vol. 16, no. 1, pp. 49–54. DOI: 10.1109/60.911403
14. Sun L., Meliopoulos A.P.S., Liu Y., Xie B. Dynamic state estimation based synchronous generator model calibration using PMU data. *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 2017*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/pesgm.2017.8274647
15. Xu Y., Li Y., Miao Z. Nonlinear least-square estimation (LSE)-based parameter identification of a synchronous generator. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, Morgantown, WV, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/naps.2017.8107385
16. Mogharbel B., Fan L., Miao Z. Least squares estimation-based synchronous generator parameter estimation using PMU data. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/pesgm.2015.7286559
17. Ning Kang, Liao Y. Some experiences in estimation of synchronous generator parameters. *2009 41st Southeastern Symposium on System Theory, Tullahoma, TN, 2009*, pp. 133–138. DOI: 10.1109/ssst.2009.4806784
18. Wehbe Y., Lingling Fan, Zhixin Miao. Least squares based estimation of synchronous generator states and parameters with phasor measurement units. *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, Champaign, IL, 2012, pp. 1–6. DOI: 10.1109/naps.2012.6336346
19. Guo S., Norris S., Bialek J. Adaptive Parameter Estimation of Power System Dynamic Model Using Modal Information. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 2854–2861. DOI: 10.1109/tpwrs.2014.2316916
20. Wei Chen, Qingwu Gong, Tao Wang, Chuanye Yin, Jingsong Yao. A real-parameter genetic algorithm application in parameters identification for synchronous generator. *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, 2009, pp. 762–766. DOI: 10.1109/icicisys.2009.5358021
21. Guodong Liao, Mengjiao Li, Shuai Xiao, Q. Shao, Longyuan Li, Bowei Hu. Measurement-based dynamic equivalent modeling for small and medium hydropower generator group. *2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 2016, pp. 348–353. DOI: 10.1109/ICSGCE.2016.7876082
22. Jahromi M.E., Firouzi B., Ranjbar A.M. Possibility of large synchronous generator parameters estimation via on-line field tests using genetic algorithm. *2006 IEEE Power India Conference*, New Delhi, 2006, pp. 6–14. DOI: 10.1109/poweri.2006.1632629
23. Arjona M.A., Cisneros-González M., Hernández C. Parameter Estimation of a Synchronous Generator Using a Sine Cardinal Perturbation and Mixed Stochastic-Deterministic Algorithms. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 486–493. DOI: 10.1109/tie.2010.2047833
24. Talebi M.A., Rahimpour M., Gholami A., Vahedi A., Shayanfar H.A. A Genetic Algorithm Approach for Identifying Synchronous Generator Parameters from Excitation Disturbance Test. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007*, pp. 1–8. DOI: 10.1109/pes.2007.385552
25. Huang J., Corzine K.A., Belkhatay M. Online Synchronous Machine Parameter Extraction From Small-Signal Injection Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 43–51. DOI: 10.1109/tec.2008.2008953
26. Zhang J., Xue A., Bi T., Wang Z., Tang W. On-Line Synchronous Generator's Parameters Identification with Dynamic PMU Data. *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Shanghai, 2012, pp. 1–4. DOI: 10.1109/appeec.2012.6307734
27. Rahimpour M., Talebi M.A., Shayanfar H.A., Azad Hosseini M.R. On line synchronous generator parameters estimation based on applying small disturbance on excitation system using ANN. *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1109/psce.2009.4840154
28. Shafiqhi A., Chahkandi H., Jahani R., Fazli M., Shayanfar H.A. ANN observer for on-line estimation of synchronous generator dynamic parameters. *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*, Xi'an, 2011, pp. 674–677. DOI: 10.1109/iccsn.2011.6014179
29. Sun L., Qu P., Huang Q., Ju P. Parameter Identification of Synchronous Generator by Using Ant Colony Optimization Algorithm. *2007 2-nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Harbin, 2007, pp. 2834–2838. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318929

30. Hutchison G., Zahawi B., Giaouris D., Harmer K., Stedall B. Parameter estimation of synchronous machines using particle swarm optimization. *2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Singapore, 2010, pp. 348–351. DOI: 10.1109/pmaps.2010.5528898
31. J. Noel Hernandez Perez, O. Sandre Hernandez, R. Morales Caporal, J. d.J. Rangel Magdaleno, H. Peregrina Barreto. Parameter Identification of a Permanent Magnet Synchronous Machine based on Current Decay Test and Particle Swarm Optimization. *IEEE Latin America Transactions*, 2013, vol. 11, no. 5, pp. 1176–1181. DOI: 10.1109/tla.2013.6684392
32. Vermeulen H.J., Strauss J.M., Shikoana V. On-line estimation of synchronous generator parameters using PRBS perturbations. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, 2002, pp. 996–1001. DOI: 10.1109/pess.2002.1043543
33. Karrari M., Malik O.P. Identification of physical parameters of a synchronous Generator from online measurements. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 407–415. DOI: 10.1109/tec.2003.822296
34. Berhausen S., Paszek S. Calculation of Selected Parameters of Synchronous Generators of Different Construction Based on the Analysis of the Waveforms for a Two-Phase Short-Circuit. *2018 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Andrychów, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/isem.2018.8442677
35. Frolov M.Y., Fishov A.G. Electric parameters identification of synchronous generator connecting to the grid. *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Novosibirsk, 2016, pp. 243–246. DOI: 10.1109/ifost.2016.7884238
36. Cari E.P.T., Alberto L.F.C. Parameter estimation of synchronous generators from different types of disturbances. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1–7. DOI: 10.1109/pes.2011.6039592
37. Huang R., Farantatos E., Cokkinides G.J., Meliopoulos A.P. Physical parameters identification of synchronous generators by a dynamic state estimator. *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, 2013, pp. 1–5. DOI: 10.1109/pesmg.2013.6672882
38. Cisneros-Gonzalez M., Hernandez C., Morales-Caporal R., Bonilla Huerta E., Arjona M. Parameter estimation of a synchronous generator two-axis model based on the standstill chirp test, *Energy Conversion. IEEE Transactions on*, 2013, vol. 28, no. 1, pp. 44–51. DOI: 10.1109/tec.2012.2236433
39. Agahi H., Karrari M., Mahmoodzadeh A. Two New Methods for Synchronous Generator Parameter Estimation. *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, 2007, pp. 1061–1066. DOI: 10.1109/pct.2007.4538462
40. Guo S., Bialek J. Synchronous machine inertia constants updating using Wide Area Measurements. *2012 3-rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, 2012, pp. 1–7. DOI: 10.1109/isgteurope.2012.6465659
41. Agahi H., Karrari M., Rosehart W., Malik O.P. Application of active identification method to synchronous generator parameter estimation. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que., 2006, pp. 7–15. DOI: 10.1109/pes.2006.1709158
42. Gerald E.L., Fernandes T.C.C., Ramos R.A. Estimation of synchronous generator model parameters operating under unbalanced three-phase conditions. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/pesgm.2015.7286271
43. Tang L., McCalley J. Trajectory sensitivities: Applications in power systems and estimation accuracy refinement. *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, July 2013, pp. 1–5. DOI: 10.1109/pesmg.2013.6672533
44. Cari E., Alberto L., Martins A., Bretas N. A methodology for the estimation of synchronous generator and excitation system parameters. *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, June 2005, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ptc.2005.4524677
45. Bliznyuk D.I., Berdin A.S., Gerasimov A.S. Defining the Equivalent Inertia Constant of Generating Unit Based on Electromechanical Transient Measurements. *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON)*, Riga, Latvia, 2016. – pp. 1–5. DOI: 10.1109/rtucon.2016.7763098
46. Bliznyuk D.I., Berdin A.S., Gerasimov A.S., Kovalenko P.Y., Dekhtiar S.A. Defining the Damping Properties of Synchronous Generator Using Disturbance Measurements. *2017 9-th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/icitee.2017.8250472

Бердин Александр Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; asberdin@gmail.com.

Мойсейченков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; a.n.moiseichenkov@urfu.ru.

Коваленко Павел Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; P.J.Kovalenko@urfu.ru.

Сенюк Михаил Дмитриевич, аспирант, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; mdsenuk@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-5589-7922.

Мухин Валентин Иванович, аспирант, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; valentinmukhin@yandex.ru.

Поступила в редакцию 29 января 2020 г.

DOI: 10.14529/power200412

OVERVIEW OF METHODS FOR DETERMINING PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

A.S. Berdin, asberdin@gmail.com,
A.N. Moiseychev, a.n.moiseichenkov@urfu.ru,
P.Yu. Kovalenko, P.J.Kovalenko@urfu.ru,
M.D. Senyuk, mdsenuk@gmail.com,
V.I. Mukhin, valentinmukhin@yandex.ru

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

A synchronous generator is one of the key elements of any power system, having a significant impact on the stability and reliability of consumers' power supply. Nowadays, the power systems emergency and operational control issues are being solved using computational models, the parameters whereof are determined using the reference data, or the data obtained during testing. High dependence of the models' parameters on various external factors leads to a significant decrease in the accuracy of solving the issues of emergency and operational control. Identification based on the traditional telemetry systems or synchrophasor measurements is used to improve the accuracy of parameters of the power systems' computational models. The purpose of this research lies in a meta-analysis of the available studies aimed at developing a methodology for determining parameters of a synchronous generator on the basis of measurement data. Russian and foreign studies were analyzed and grouped to achieve this goal. After that, for each group, advantages, disadvantages, and the area of application were identified. As a result, it is shown that the existing methods for determining parameters of synchronous generators based on measurement data cannot adapt to the source dataset and also require significant computing power. As a way to overcome these shortcomings, an adaptive model of a synchronous machine is proposed.

Keywords: synchronous generator, equivalent circuit parameters, research review.

Received 29 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Обзор методов определения параметров моделей синхронных генераторов / А.С. Бердин, А.Н. Мойсейченков, П.Ю. Коваленко и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 103–111. DOI: 10.14529/power200412

FOR CITATION

Berdin A.S., Moiseychev A.N., Kovalenko P.Yu., Senyuk M.D., Mukhin V.I. Overview of Methods for Determining Parameters of Synchronous Generators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 103–111. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200412