

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ В НИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Б.Д. Малюта

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭЭ, гр. АЗ-42*

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

Введение

Активный рост установленных мощностей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистемах (ЭС) по всему миру оказывает значительное, преимущественно негативное, влияние на их динамические свойства. Это обусловлено как отсутствием у некоторых видов ВИЭ инерционных свойств и резервов первичной мощности, так и тем, что значительное их число подключаются к ЭС через силовые преобразователи (СП), алгоритмы управления которых не способны обеспечить инерционный отклик и участие СП в процессах регулирования частоты.

Одним из актуальных решений данной проблемы является применение алгоритмов управления СП, эмулирующих синхронные машины. Такие алгоритмы наделяют СП инерционными свойствами и возможностью участвовать в процессах регулирования частоты и напряжения по аналогии с традиционными синхронными генераторами. В то же время существует значительное число таких алгоритмов, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Для их разработки и интеграции в ЭС необходимо предварительное исследование, осуществляемое посредством математического моделирования и применения различных методов.

Одной из таких методик является модальный анализ, позволяющий исследовать динамические свойства рассматриваемого объекта без осуществления численного моделирования во временной области. Однако результаты такого анализа могут быть сложны для интерпретации. В рамках данной работы на примере одномашинной ЭС проводится модальный анализ матрицы состояния системы, а затем полученные результаты применяются для анализа её динамического отклика по активной мощности и частоте.

Описание структуры исследуемой системы

В рамках данной работы рассматривается одномашинная ЭС, состоящая из источника постоянного напряжения, трёхфазного инвертора, управляемого алгоритмом ВСГ-Н, RLC-фильтра и энергосистемы, эквивалентированной по теореме Тевенена до источника и активно-индуктивного импеданса. Принципиальная схема модели ЭС приведена на рис. 1.

Построение модели в пространстве состояний

Система уравнений, описывающая рассматриваемую ЭС имеет 13-й порядок. Для применения модального анализа данную систему необходимо линеаризовать и представить в матричном виде:

$$\Delta \dot{X} = A \cdot \Delta X + B \cdot \Delta U, \quad (1)$$

где A – матрица состояния математической модели рассматриваемой системы; ΔX , $\Delta \dot{X}$ – вектор-столбец линеаризованных переменных состояния и их производных соответственно;

B – матрица коэффициентов при входных величинах, ΔU – вектор-столбец линеаризованных входных величин.

Структурная схема, описывающая работу алгоритма ВСГ-Н, приведена на рис. 2.

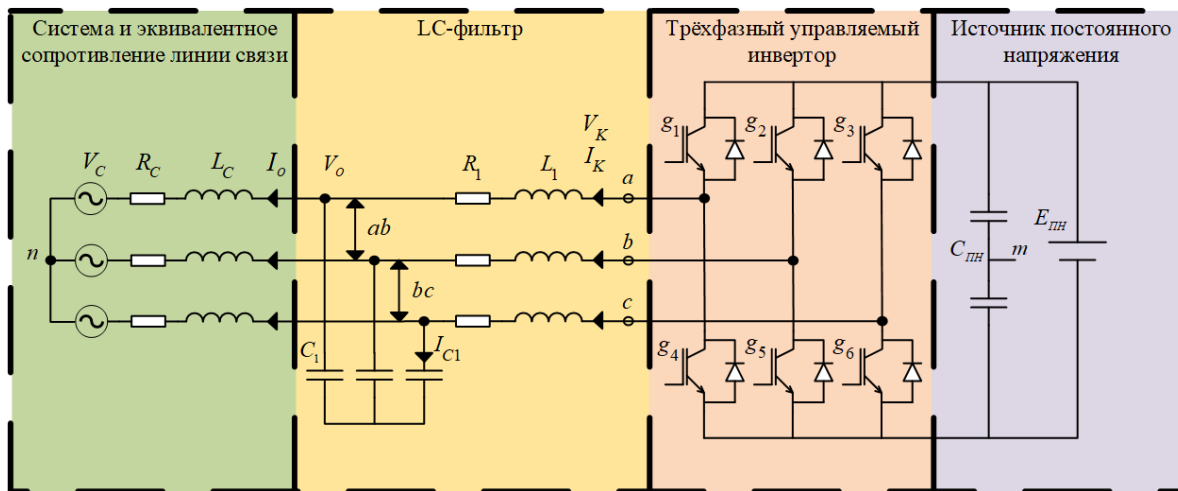


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой ЭС

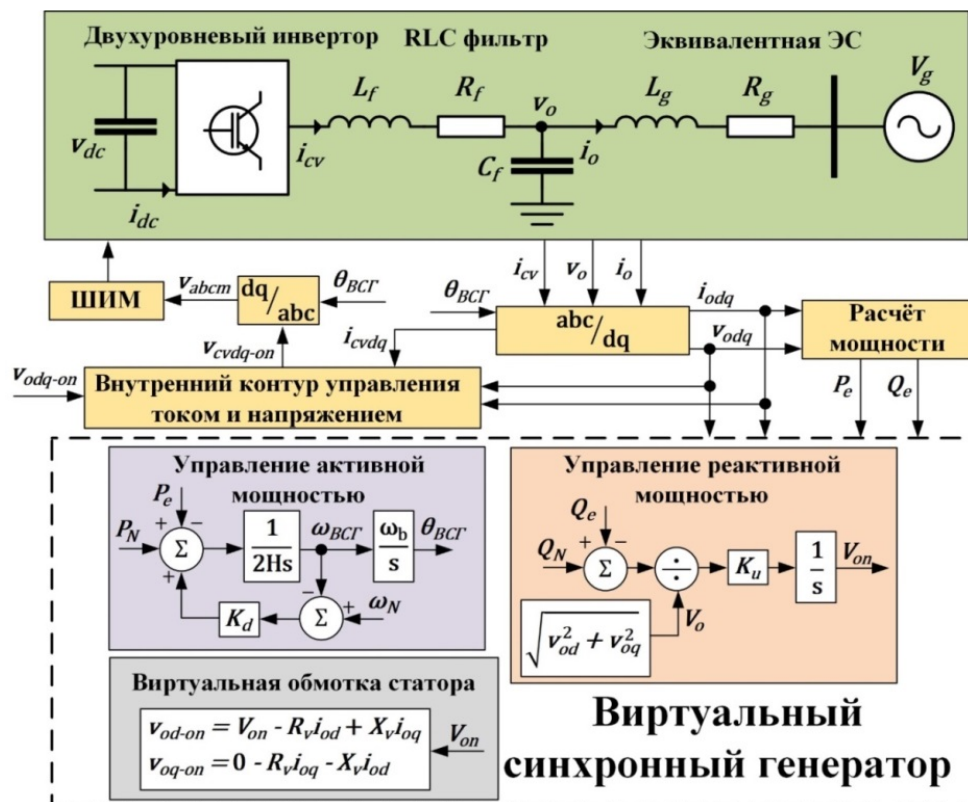


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ВСГ-Н

Верификация модели в пространстве состояний

Прежде чем применять инструментарий модального анализа к линеаризованной модели, необходимо верифицировать её посредством сравнения с результатами нелинейной модели. Для верификации были рассмотрены кривые активной мощности и частоты при возмущении, заданном изменением уставки по активной мощности от 0 до 0.2 о.е. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

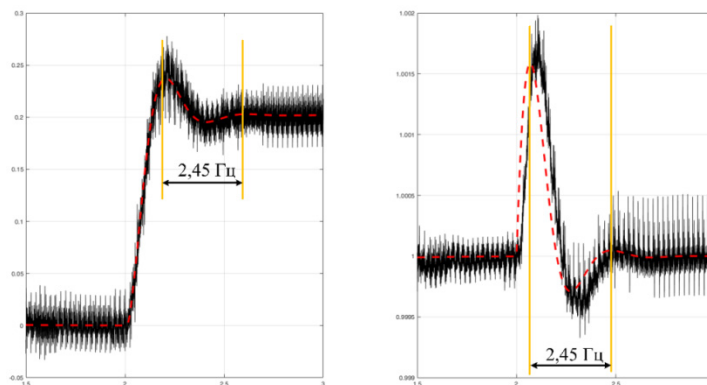


Рис. 3. Сравнительные отклики линеаризованной (красный пунктир) и детальной (чёрная сплошная линия) моделей по активной мощности (слева) и частоте (справа) во времени

Линеаризованные отклики не отражают всех колебаний выходных величин, но изменяются в тех же диапазонах и с теми же тенденциями. Наблюдается незначительная задержка во времени у отклика по частоте. Таким образом, линеаризованная модель прошла верификацию и может быть применена для модального анализа.

Модальный анализ линеаризованной модели

Одной из задач модального анализа систем является определение мод колебаний системы – собственных чисел матрицы состояний A , характеризующих характер динамических процессов в рассматриваемой системе. Результаты расчёта собственных чисел, частот их колебаний в герцах и декремента затухания, характеризующего демпфирование колебаний мод, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные числа матрицы состояний A

Мода	Собственное число	Частота колебаний, Гц	Декремент затухания
$\lambda_{1,2}$	$-964.4 \pm 3389.5i$	539.46	0.27
$\lambda_{3,4}$	$-761.5 \pm 3091.7i$	492.06	0.24
$\lambda_{5,6}$	$-3300.9 \pm 299.5i$	47.67	1.00
$\lambda_{7,8}$	$-33.6 \pm 155.6i$	24.76	0.21
$\lambda_{9,10}$	$-8.5 \pm 15.4i$	2.45	0.48
λ_{11}	-3.3	0.00	1.00
λ_{11}	-13.2	0.00	1.00
λ_{13}	-13.2	0.00	1.00

Моды с высокими частотами колебаний ($\lambda_{1,2}$, $\lambda_{3,4}$, $\lambda_{5,6}$, $\lambda_{7,8}$) влияют, как правило не на характер изменения выходной величины, а на её дополнительные колебания. Такие, например, видны у откликов детальной модели.

Чем меньше собственная частота колебаний моды, тем больше влияния она оказывает на тенденцию изменения выходной величины. Частота колебаний как активной мощности, так и частоты (рис. 3) совпадает с частотой мод $\lambda_{9,10}$, хотя данная мода демпфирована значительно лучше мод $\lambda_{1,2}$, $\lambda_{3,4}$ и $\lambda_{7,8}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D'Arco S., Are Suul J., Bjarte O. Fosso Automatic Tuning of Cascaded Controllers for Power Converters Using Eigenvalue Parametric Sensitivities // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – V. 51 – P. 1743–1753.