

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

Б.Д. Малюта
Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ1Ч

Введение

В настоящее время активно развиваются и интегрируются в энергосистемы (ЭС) возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Их мощности растут, в связи с чем становится острее вопрос сохранения устойчивости ЭС при растущем участии в них ВИЭ. Данная проблема обусловлена тем, что инверторы, посредством которых осуществляется подключение различных ВИЭ, низкоинерционны.

Одним из решений данной проблемы является формирование подходящего алгоритма управления инвертором. Актуальной на данный момент является концепция виртуального синхронного генератора (ВСГ), в рамках которой алгоритм управления инвертором имитирует характерные особенности синхронных генераторов: инерционность, статизм по напряжению и частоте.

В то же время важным вопросом является изучение динамических характеристик энергосистемы, её устойчивости при интеграции генерирующих установок с силовыми преобразователями, управляемых посредством ВСГ. В данном аспекте значимую роль играет модальный анализ, позволяющий исследовать динамические свойства рассматриваемого объекта без осуществления численного моделирования во временной области. В рамках данной работы модальный анализ применяется для изучения мод колебаний рассматриваемой системы, определения параметров, влияющих на наиболее значимые из них.

Описание структуры исследуемой системы

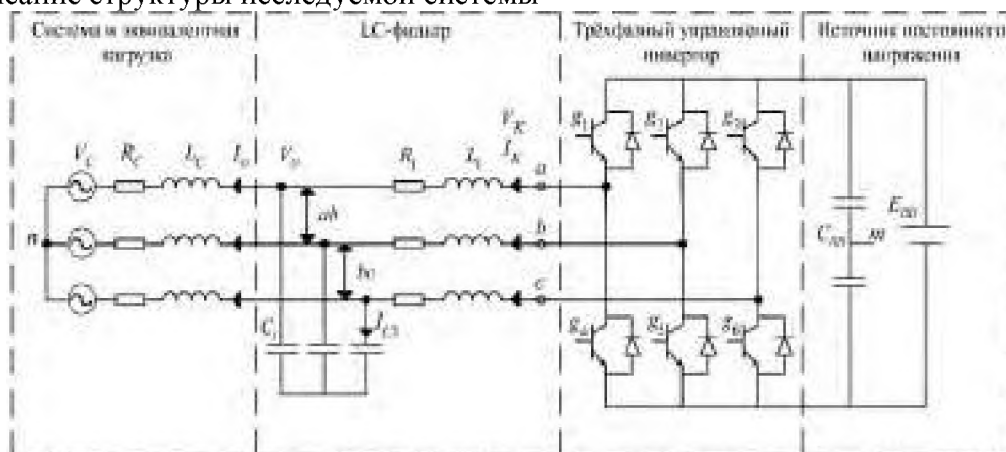


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой системы

В рамках данной работы рассматривается система, состоящая из источника постоянного напряжения, трёхфазного инвертора, RLC-фильтра и энергосистемы, эквивалентированной по теореме Тевенена до источника и эквивалентных активного сопротивления и индуктивности. Стоит отметить, что источник постоянного напряжения подаёт питание на вход инвертора через буферную ёмкость – она необходима для имитации инерционности ротора генератора при его пуске/остановке. Принципиальная схема данной системы приведена на рисунке 1 [1].

Построение модели в пространстве состояний

В данном случае система описывается посредством 13 переменных состояния. Соответственно, необходимо 13 уравнений. Однако, решение столь громоздкой системы осложняется

её нелинейным характером. Для дальнейших расчётов целесообразно линеаризовать рассматриваемую систему уравнений.

Математическое описание данной системы возможно представить в матричном виде следующим образом:

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

где A – матрица состояния математической модели рассматриваемой системы, $\Delta X, \Delta \dot{X}$ – вектор-столбец линеаризованных переменных состояния и их производных соответственно, B – матрица коэффициентов при входных величинах, U – вектор-столбец линеаризованных входных величин.

Для применения инструментов модального анализа необходим анализ только матрицы состояния A , поэтому имеет смысл продемонстрировать только её [1]:

$$A = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6 \ A_7 \ A_8 \ A_9 \ A_{10} \ A_{11} \ A_{12} \ A_{13}]^T \quad (2)$$

$$A_1 = \left[0 \ \omega_b \omega_{g0} \ 0 \ 0 \ \frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right] \quad (3)$$

$$A_2 = \left[-\omega_b \omega_{g0} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{\omega_b}{c_1} \ 0 \ -\omega_b v_{od0} \ 0 \right] \quad (4)$$

$$A_3 = \left[-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -m_q \ 0 \ 0 \right] \quad (5)$$

$$A_4 = \left[0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right] \quad (6)$$

$$A_5 = \left[\frac{-1-k_{pc}k_{pv}+k_{FFv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad -\frac{k_{pc}c_1\omega_{g0}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad \frac{k_{pc}k_{iv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad -\frac{k_{pc}+r_1}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{ic}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{FFi}k_{pc}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{-k_{pc}k_{pv}m_q}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad 0 \right] \quad (7)$$

$$A_6 = \left[\frac{k_{pc}c_1\omega_{g0}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad \frac{-1-k_{pc}k_{pv}+k_{FFv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{pc}k_{iv}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad -\frac{k_{pc}+r_1}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{ic}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{FFi}k_{pc}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \quad \frac{k_{pc}c_1v_{od0}}{\frac{l_1}{\omega_b}} \quad 0 \right] \quad (8)$$

$$A_7 = \left[-k_{pv} \quad -c_1\omega_{g0} \quad k_{iv} \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad k_{FFi} \quad 0 \quad -k_{pv}m_q \quad 0 \quad 0 \right] \quad (9)$$

$$A_8 = \left[c_1\omega_{g0} \quad -k_{pv} \quad 0 \quad k_{iv} \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad k_{FFi} \quad 0 \quad c_1v_{od0} \quad 0 \right] \quad (10)$$

$$A_9 = \left[\frac{1}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{r_g}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad \omega_b \omega_{g0} \quad 0 \quad \omega_b i_{oq0} \quad \frac{v_{g0} \sin \delta \theta_0}{\frac{l_g}{\omega_b}} \right] \quad (11)$$

$$A_{10} = \left[0 \quad \frac{1}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\omega_b \omega_{g0} \quad -\frac{r_g}{\frac{l_g}{\omega_b}} \quad 0 \quad -\omega_b i_{od0} \quad \frac{v_{g0} \cos \delta \theta_0}{\frac{l_g}{\omega_b}} \right] \quad (12)$$

$$A_{11} = \left[-\omega_f i_{oq0} \quad \omega_f i_{od0} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\omega_f i_{od0} \quad -\omega_f \quad 0 \quad 0 \right] \quad (13)$$

$$A_{12} = \left[-\frac{i_{od0}}{T_a} \quad -\frac{i_{oq0}}{T_a} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{v_{od0}}{T_a} \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{k_d}{T_a} \quad 0 \right] \quad (14)$$

$$A_{13} = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \omega_b \quad 0 \right] \quad (15)$$

Анализ модели в пространстве состояний

Одной из задач модального анализа систем является определение мод колебаний системы – её собственных чисел, точнее собственных чисел матрицы состояний A . Это можно осуществить посредством различных математических программных комплексов. В данной работе все расчёты осуществляются в программном комплексе Matlab. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1. Собственные числа матрицы состояний A

λ_1	$-174 + j2607$	λ_4	$-37 - j2127$	λ_7	$-1776 + j144$	λ_{10}	$-0,1 - j4$	λ_{13}	-0.3
λ_2	$-174 - j2607$	λ_5	-5000	λ_8	$-1776 - j144$	λ_{11}	-31		
λ_3	$-37 + j2127$	λ_6	-3200	λ_9	$-0,1 + j4$	λ_{12}	-32		

Наибольший интерес представляют корни, обуславливающие колебательный характер переходных процессов в рассматриваемой системе. Такие корни имеют мнимую часть. Вели-

чина мнимой составляющей представляет собой частоту колебаний в рад/с, величина действительной части характеризует демпфирование моды (чем она меньше в абсолютном выражении, тем больше демпфирование моды).

С этой точки зрения особый интерес представляют пары комплексно-сопряжённых мод $\lambda_{3,4}$ и $\lambda_{9,10}$, т. к. в первом случае частота колебаний высока при довольно слабом демпфировании, а во втором демпфирование крайне мало.

Поскольку ВСГ представляет собой программу управления трёхфазным инвертором, существует набор регулируемых параметров. Изменяя их, возможно повлиять на характер переходных процессов в рассматриваемой системе. Для анализа данного влияния воспользуемся инструментарием модального анализа, позволяющим оценить влияние отдельных параметров матрицы состояния на конкретные моды – коэффициентом чувствительности (КЧ) моды к параметру. Он рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$\alpha_{n,k} = \frac{\partial \lambda_n}{\partial \rho_k} = \frac{\Psi_n \frac{\partial A}{\partial \rho_k} \Phi_n}{\Psi_n \cdot \Phi_n} \quad (16)$$

В данной формуле Ψ_n – n -я строка левой собственной матрицы, Φ_n – n -й столбец правой собственной матрицы, $\frac{\partial A}{\partial \rho_k}$ – матрица частных производных элементов матрицы состояния A по интересующему параметру ρ_k .

Рассчитаем чувствительность моды λ_3 для следующих параметров: $R_1, L_1, C_1, R_g, L_g, k_{pc}, k_{ic}, k_{pv}, k_{iv}, m_q, \omega_f, k_D, T_a, k_{FFi}, k_{FFv}$. Результаты расчёта в графическом виде приведены на рисунке 2. Коэффициент чувствительности может быть действительным, мнимым или комплексным. Соответственно, в первом случае параметр влияет только на действительную часть моды, во втором – на мнимую, в третьем – на обе. Причем, если действительная часть коэффициента положительна, при увеличении параметра вырастет и действительная часть моды, а при уменьшении – уменьшится. При отрицательном знаке действительной части всё будет ровно наоборот. В случае с мнимой частью логика ровно обратна. Стоит отметить, что ниже приведены результаты только для действительных частей коэффициентов чувствительности.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод: на моду λ_3 наибольшее влияние имеют индуктивность фильтра, параметры эквивалентной сети, а также коэффициенты $k_{pc}, k_{pv}, k_{FFi}, k_{FFv}$ – настраиваемые параметры ВСГ. Проверка полученных результатов осуществляется на примере зависимостей действительной части моды λ_3 от изменения параметров k_{FFv} и k_{pv} . Результаты расчёта данных зависимостей приведены так же на рисунке 2.

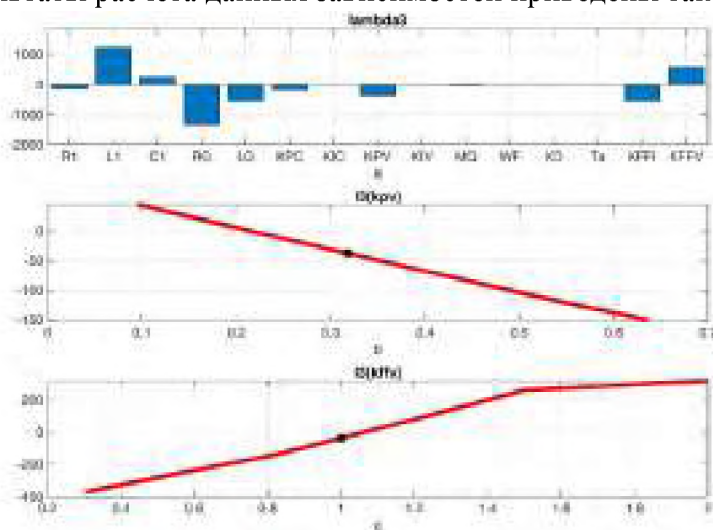


Рис. 2. Результаты расчёта:

a – действительные части КЧ моды λ_3 , b – зависимость действительной части моды λ_3 от величины k_{pv} , c – зависимость моды λ_3 от величины k_{FFv}

Анализируя полученные графические зависимости, можно сделать вывод: теоретические положения верны. Действительно, действительная часть коэффициента чувствительности моды λ_3 к параметру k_{FFV} положительна, значит, с ростом этого параметра должна увеличиваться и действительная часть данной моды. Данное положение выполняется. То же верно и в случае с параметром k_{pv} .

ЛИТЕРАТУРА:

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

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

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

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ И СУБСИНХРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

А.Е. Петрова

Томский политехнический университет

ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ21

Согласно данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), в 2021 году установленная мощность электростанций на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) во всем мире увеличилась на 9,2 %: с 2807 ГВт до 3064 ГВт. В частности, установленная мощность ветряных электростанций (ВЭС) увеличилась на 12,7% (с 732 ГВт до 825 ГВт), солнечных электростанций (СЭС) – на 18,4 % (с 717 ГВт до 849 ГВт) [1].

С ростом числа такого рода электростанций и их доли в общей выработке электроэнергии встает вопрос о влиянии, которое они оказывают на устойчивость энергосистем. В большинстве случаев объекты ВИЭ-генерации устанавливаются в энергорайонах с малым количеством источников традиционной генерации: тогда связь между электростанцией на ВИЭ и традиционной осуществляется посредством длинных линий с большим индуктивным сопротивлением. Указанные сети принято называть слабыми, потому что они являются менее стабильными по напряжению при неисправностях в сети, чем сильные сети. В качестве меры слабости сети применяют отношение короткого замыкания (ОКЗ или англ. SCR), значение которого можно вычислить, зная мощность короткого замыкания сети при номинальном напряжении и номинальную мощность электростанции на ВИЭ на постоянном токе [2]. ОКЗ обратно пропорционален индуктивному сопротивлению, следовательно, чем меньше ОКЗ, тем больше электрическая удаленность объекта ВИЭ-генерации от традиционной. Так, к слабым сетям относят системы с ОКЗ меньше 3, к очень слабым – с ОКЗ меньше 2. ОКЗ является универсальным показателем слабости сети для исследования ее способности поддерживать необходимый уровень напряжения при внешних возмущениях. Поэтому неудивительно, что большинство аварий, происшедших в разных энергосистемах мира с ВИЭ-генерацией в составе, происходило в слабых сетях. Причем в зависимости от конкретной схемно-режимной ситуации при нарушении колебательной устойчивости частота колебаний оказывалась различной. Например, в Техасе, США были зафиксированы случаи низкочастотных колебаний, тогда как в Китае имели место субсинхронные изменения параметров режима [3]. В связи с этим целью данной работы является анализ факторов, приводящих к нарушению колебательной устойчивости энергосистем с ВИЭ.