

УДК 621.316.761.2: 621.311.016.35
DOI: 10.18799/29495407/2025/4/105
Шифр специальности ВАК: 2.4.3
Научная статья



Анализ влияния контура фазовой автоподстройки частоты СТАТКОМ на устойчивость электроэнергетических систем

И.В. Уманский[✉]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]umansky@tpu.ru

Аннотация. Проводилось создание математической модели СТАТКОМ в программном комплексе MatLab, создание и настройка модели системы автоматического управления СТАТКОМ, расчет динамической и статической апериодической по методу малого сигнала, устойчивости линейной одномашиной электроэнергетической системы в различных режимах работы.

Ключевые слова: СТАТКОМ – статический синхронный компенсатор, компенсатор реактивной мощности, система автоматического управления, статическая устойчивость, динамическая устойчивость, устойчивость электроэнергетических систем

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Приоритет-2030-ЭЭЗЦ-015-198-2025» «Гибридные энергокомплексы на постоянном и переменном токе для распределённой энергетики».

Для цитирования: Уманский И.В. Анализ влияния контура фазовой автоподстройки частоты СТАТКОМ на устойчивость электроэнергетических систем // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 4. – С. 46–54. DOI: 10.18799/29495407/2025/4/105

UDC 621.316.761.2: 621.311.016.35
DOI: 10.18799/29495407/2025/4/105
Scientific paper



Analysis of phase-locked loop of STATCOM effect on power system stability

I.V. Umansky[✉]

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]umansky@tpu.ru

Abstract. The author created STATCOM mathematical model in the MatLab software package, developed and configured a STATCOM model of automatic control system, assessed parameters of dynamic and small signal stability of a linear single-generator electric power system in various operating modes.

Keywords: STATCOM – static synchronous var compensator, reactive power compensator, automatic control system, small signal stability, dynamic stability, stability of electric power systems

Acknowledgements: Scientific paper was written during the program "Priority-2030-EEZC-015-198-2025" "Hybrid DC and AC power systems for distributed energy".

For citation: Umansky I.V. Analysis of phase-locked loop of STATCOM effect on power system stability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 4, pp. 46–54. DOI: 10.18799/29495407/2025/4/105

Введение

Режимное единство параллельно работающих подсистем в условиях ограниченности пропускных способностей, динамичное строительство и модернизация электростанций большой мощности, развитие систем распределенной генерации, объектов альтернативной энергетики выдвигают на первый план проблему обеспечения устойчивости и живучести, определяемых не показателями работоспособности отдельных элементов, а функциональными свойствами энергорайона в целом. Кроме того, обязательным условием нормального электроснабжения электроустановок потребителей является соблюдение необходимого качества и количества электрической энергии.

В данном контексте наблюдается тенденция увеличения использования высоковольтных полупроводниковых элементов, в том числе преобразователей тока и напряжения, а одним из актуальных направлений развития энергетического сектора как в России, так и за рубежом является применение гибридных электрических сетей. В такой ситуации возникает серьезная проблема качества электроэнергии, включающая в себя как значительные отклонения действующего напряжения от номинальных значений, так и наличие высокого гармонического ряда в сети [1].

В качестве решения данной проблемы могут выступать устройства гибкой передачи тока (FACTS – Flexible Alternative Current Transmission Systems), которые играют ключевую роль в повышении устойчивости и надежности электроэнергетических систем. Эти устройства предназначены для управления реактивной мощностью и стабилизации напряжения в сетях, что особенно актуально в условиях растущей доли возобновляемых источников энергии и увеличения электрических нагрузок [2].

Одним из устройств системы FACTS является статический компенсатор реактивной мощности СТАТКОМ, который использует силовую электронику для автоматизированного управления реактивной мощностью и поддержания стабильности напряжения [3].

Общие положения об устройствах

Устройства FACTS объединяют в себе передовые технологии силовой электроники, предназначенные для повышения эффективности и гибкости сетей переменного тока. Эти системы оптимизируют распределение мощности и регулируют уровни напряжения. Согласно определению IEEE, FACTS охватывают статическое оборудование, использующее силовую электронику, для управления параметрами одной или нескольких линий электропередачи переменного тока, что позволяет увеличить предел передаваемой мощности и улучшить

управляемость энергорайона. В России определение FACTS также включает в себя устройства постоянного тока. [4].

Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ; static synchronous compensator – STATCOM) является ключевым представителем семейства FACTS. Он представляет собой устройство на базе статического преобразователя, выполняющее функцию компенсатора реактивной мощности. Его отличительная особенность – возможность зависимости от действительного напряжения сети регулирования выходного тока, который может быть как емкостным, так и индуктивным. Важно упомянуть, что СТАТКОМ является основой для реализации вставок постоянного тока и разнообразных комбинационных компенсационных устройств. Сама же реализация СТАТКОМ возможна как на основе источника напряжения, так и на основе источника тока.

СТАТКОМ на сегодняшний день демонстрирует превосходство над предыдущими поколениями устройств компенсации реактивной мощности. Они имеют изменяющуюся с высокой скоростью выходную характеристику мощности и способны как генерировать, так и потреблять реактивную мощность. Основное применение – поддержание напряжения и коррекция коэффициента мощности. Их высокая динамичность и функциональность делают их незаменимыми для обеспечения стабильности сети в условиях быстро меняющихся режимов.

По своей сути, СТАТКОМ – это трехфазный источник напряжения за собственным реактансом, регулируемой амплитудой и фазным углом. Когда выходное переменное напряжение внутреннего контура установки выше (ниже), чем напряжение на шинах сети, ток от нее к шинам сети опережает напряжение (отстает от напряжения), и разница в уровнях напряжения определяет величину протекающего тока, что позволяет регулировать поток реактивной мощности [5].

Работа статического преобразователя напряжения СТАТКОМ – устройства связи установки с энергосистемой, основана на изменении протекания тока в зависимости от напряжения, соответственно его вольтамперная характеристика (далее – ВАХ) и определяет его работу.

Можно выделить две основные зоны в ВАХ СТАТКОМ: область между индуктивным и емкостным максимумами и максимальные рабочие точки. В наклонной зоне, расположенной между этими максимумами, СТАТКОМ осуществляет активное регулирование напряжения. Он может работать в режиме выдачи емкостной мощности для повышения напряжения или потребления индуктивной мощности для его снижения. Скорость этого процесса определяется наклоном характеристики, который

задается аналогично настройке скорости вращения генератора. Наклон может быть задан высоким для точного поддержания напряжения или минимальным (близким к нулю), что создает своего рода «плоскую» линию и высвобождает резервы СТАТКОМ для быстрого реагирования на динамические изменения в энергосистеме. Типичный максимальный наклон составляет порядка 5 %, гарантируя, что действительное напряжение остается в пределах 5 % от установленного номинала.

ВАХ преобразователя напряжения представлена на рис. 1.

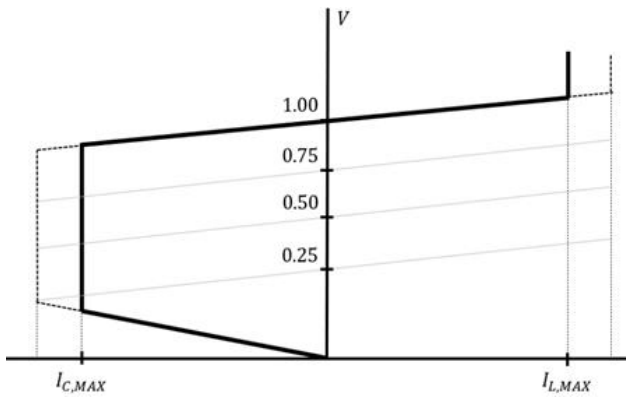


Рис. 1. Вольтамперная характеристика преобразователя напряжения

Fig. 1. Current-voltage characteristic of the voltage converter

При работе на любом из своих максимумов СТАТКОМ находится в режиме управления реактивной мощностью. В отличие от традиционного статического тиристорного компенсатора (СТК, static var compensator – SVC), у которого емкостный реактивный выход линейно зависит от напряжения, СТАТКОМ может выдавать свой максимальный номинал емкости для любого напряжения. Это дает преимущество по сравнению с СТК, так как эффективность устройства СТАТКОМ не зависит от падения напряжения, вызванного неисправностью [6].

Построение модели СТАТКОМ

Для силовой части СТАТКОМ и системы управления, изображенной на рис. 2, создадим математическую модель в программном комплексе «MatLab».

Система автоматического управления СТАТКОМ состоит из фильтро-компенсирующих установок (далее – ФКУ), закрытого контура управления фазой (ЗКРФ), контура управления мощностью и контура управления током.

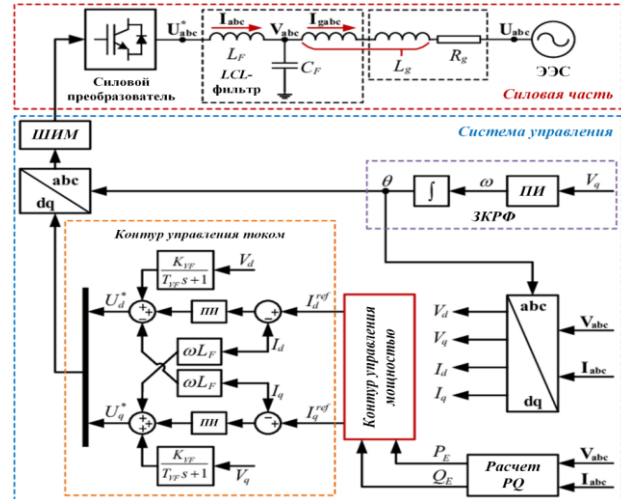


Рис. 2. Схема управления СТАТКОМ

Fig. 2. STATCOM operating circuits

ФКУ предназначена для фильтрации высших гармонических составляющих напряжения в точке подключения СТАТКОМ к системе.

В свою очередь, в ЗКРФ входит контур аналого-цифрового преобразования и контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), который предназначен для синхронизации установки и системы, иначе говоря, это система автоматического регулирования, подстраивающая угол фазы установки таким образом, чтобы он был равен фазе опорного сигнала. Регулировка осуществляется благодаря наличию отрицательной обратной связи. Выходными данными ФАПЧ являются значения фазного угла и частоты передающей сети. Можно утверждать, что время и точность работы данного контура и определяют скорость динамического отклика СТАТКОМ, поскольку выходные данные необходимы для упомянутых выше контуров, определяющих режим работы устройства.

Подробное описание проектирования контура трехфазной фазовой автоподстройки частоты описано в работе [7], по ее результатам для сравнения влияния на устойчивость выбраны два контура, изображенные на рис. 3, 4.

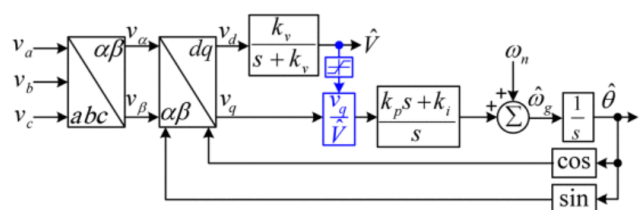


Рис. 3. Схема SRF-PLL

Fig. 3. SRF-PLL circuit

Наиболее популярной структурой ФАПЧ является синхронная система обратной связи, или синхронная

петля (synchronous referents frame phase locked loop – SRF-PLL), которая в какой-то мере является типичной. Подход основан на представлении трехфазных напряжений в синхронной системе отсчета dq [8]. При этом SRF-PLL существенно зависит от величины и изменения частоты входного сигнала и при резких изменениях может перейти в неустойчивый режим.

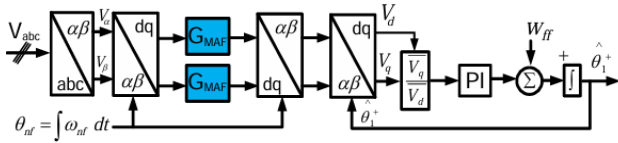


Рис. 4. Схема PMAF-PLL

Fig. 4. PMAF-PLL circuit

PMAF-PLL (prefiltering moving average filter phase locked loop) – это контур ФАПЧ со ступенью предварительной фильтрации на основе фильтра линейного напряжения («фильтр скользящего среднего» – moving average filter – MAF). Этот метод предлагает использование блока MAF в каскаде предварительной фильтрации на основе, который передает сигнал в основной контур ФАПЧ.

В непрерывной временной области передаточная функция MAF выражается следующим образом:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T_w} \int_{t-T_w}^t x(\tau) d\tau,$$

где \bar{x} и x – сигналы на выходе и входе фильтра; T_w – ширина окна пропускания фильтра.

Если перевести данное уравнение в область Лапласа, то имеем:

$$G_{MAF}(s) = \frac{1 - e^{-sT_w}}{sT_w},$$

где s – оператор Лапласа.

Заменив s на $j\omega$ в уравнении, получим выражение для коэффициента усиления и фазы фильтра:

$$G_{MAF}(j\omega) = \frac{2 \left| \sin\left(\frac{\omega T_w}{2}\right) \right|}{\omega T_w} - \frac{\omega T_w}{2}.$$

Стоит отметить, что для частот, близких к нулю, фильтр обеспечивает единичное усиление. Более того, для всех частот коэффициент усиления фильтра MAF практически равен нулю. Это означает, что фильтр MAF сохраняет всю постоянную составляющую входного сигнала и полностью удаляет все компоненты, связанные с частотами. Эта функция улучшает работу ФАПЧ в устойчивом режиме, делая его более устойчивым к содержанию гармонических составляющих в сетевом напряжении.

Теоретически для достижения идеальной фильтрации ширина окна пропускания фильтра должна быть равна частоте основной составляющей входного сигнала. Таким образом, при большем значении T_w достигается более высокая точность. Однако увеличение T_w уменьшает пропускную способность системы в режиме разомкнутого контура, что приводит к замедлению динамического отклика в режиме замкнутого контура. На практике значение ширины окна пропускания выбирается таким образом, чтобы оно было равно абсолютному значению частоты гармонической составляющей самого низкого порядка, содержащейся во входном сигнале. Для сетевых напряжений с возмущениями без составляющих постоянного тока гармоническая составляющая самого низкого порядка обусловлена основной составляющей обратной последовательности. Следовательно, с учетом преобразования Парка–Горева это значение в два раза превышает номинальную частоту сетки. Для случая, когда частота сетки равна 50 Гц, абсолютное значение частоты, соответствующее обратной последовательности, равно 100 Гц. Следовательно, $T_w = 1/100$ с. К сожалению, это значение достаточно велико, чтобы обеспечить быстрое динамическое поведение.

На основании изложенного можно утверждать, что этот фильтр обладает существенными преимуществами, включая простоту внедрения, полное подавление гармоник низкого порядка и несбалансированных напряжений, низкую вычислительную нагрузку при реализации в режиме реального времени, хорошую помехоустойчивость и т. д. [9].

Итоговая математическая модель СТАТКОМ в программном комплексе «MatLab» приведена на рис. 5.

Анализ влияния СТАТКОМ на устойчивость

Анализ влияния СТАТКОМ на устойчивость электроэнергетических систем без учета системы управления ранее была описана в работе [10]. В этой публикации произведем оценку влияния для СТАТКОМ, в системе управления которых выполнены два контура, описанных выше.

Устойчивость, в первую очередь статическая, является необходимым условием работы электроэнергетических систем, т. к. способность системы сохранять устойчивость не только в конкретно заданном диапазоне условий функционирования, определяемом флуктуациями и более глубокими изменениями режима, составляет одно из важнейших системных свойств режимной надежности энергообъединения. Эта устойчивость обычно характеризуется показателем запаса, определяемым относительной разностью текущего и предельного по устойчивости значения того или иного режимного параметра, в частности перетока активной мощности по наиболее загруженной линии связи.

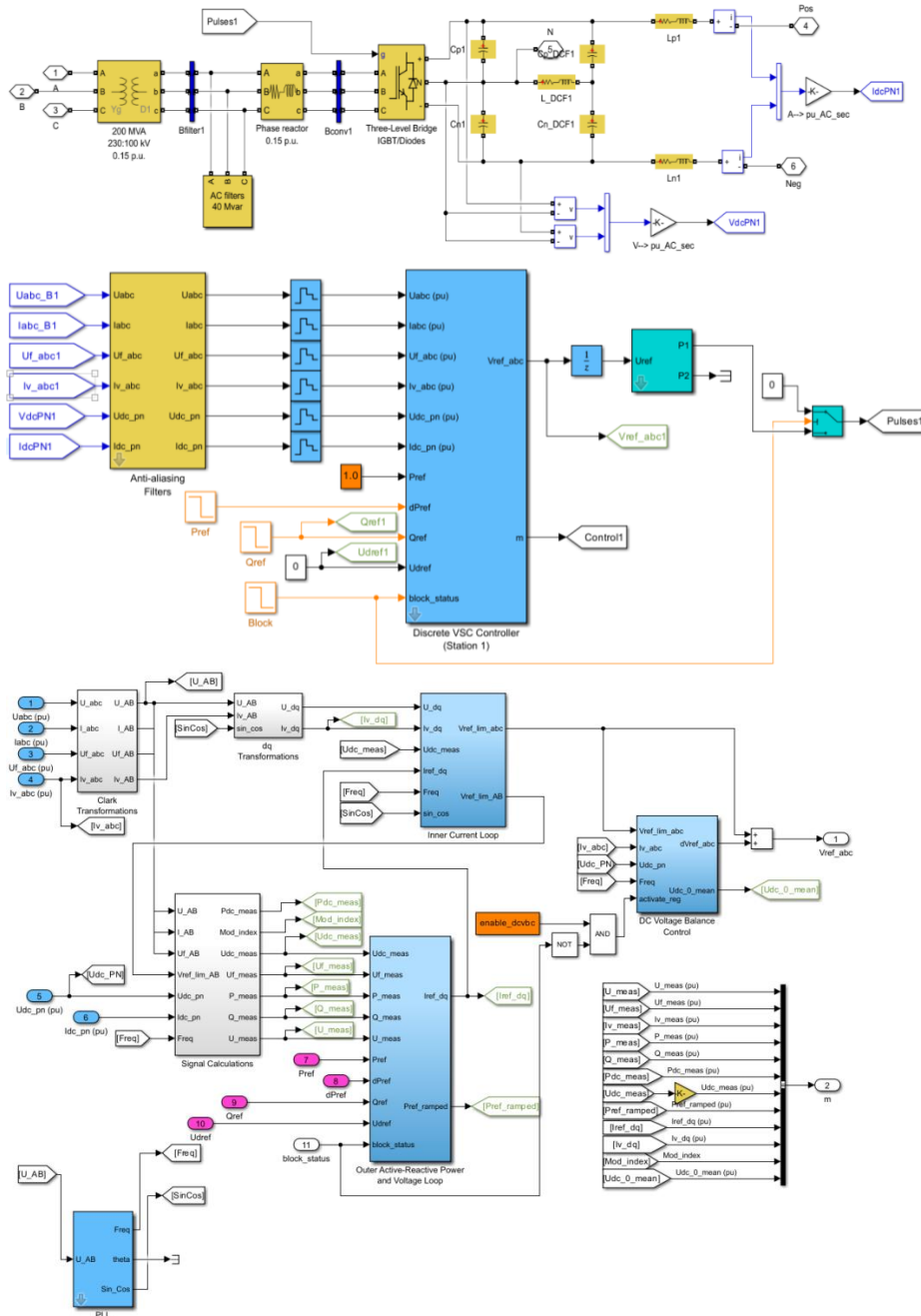


Рис. 5. Математическая модель СТАТКОМ в ПК «MatLab»
Fig. 5. Mathematical model STATCOM in «MatLab»

Исследования статической устойчивости могут проводиться в плане решения задач анализа или синтеза.

При решении задач анализа проверяется устойчивость заданного установившегося режима, определяется предельно устойчивый режим электрической системы, заданной всеми параметрами, оцениваются некоторые показатели качества переходного процесса.

При решении задач синтеза определяется тип системы возбуждения и регулирования, закон регулирования, параметры системы возбуждения и

регуляторов. При этом исходят из заданных требований к предельно устойчивому режиму или качеству электроэнергии в установившемся режиме [11].

Произведем оценку влияния СТАТКОМ на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы (рис. 6, 7) решением задач анализа с помощью ПК «PSAT MatLab».

При установлении простейших условий статической устойчивости ответ получается только в форме «уйдет–не уйдет» режим из устойчивого состояния при малом возмущении системы.

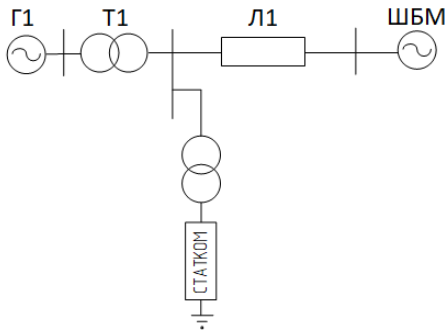


Рис. 6. Исследуемая одномашинная линейная схема энергорайона

Fig. 6. Single-generator linear scheme of the power system

При математической формулировке задачи движение электрической системы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида (1) [12]:

$$\sum_{j=1}^m \left(A_{ji} \frac{d^2 x_i}{dt^2} + B_{ji} \frac{dx_i}{dt} + C_{ji} x_i \right) = F_j(t), \quad (1)$$

где A_{ji} , B_{ji} , C_{ji} – действительные коэффициенты, определяемые параметрами системы и нелинейными функциями; x_i – переменные, характеризующие состояние

системы в каждый момент времени; $F_j(t)$ – внешние возмущающие силы, переменные во времени, отражающие изменение внешних условий системы.

Таким образом, исследование проблемы статической устойчивости энергосистемы сводится к анализу устойчивости решением дифференциальных уравнений, которые могут быть представлены в виде матричных уравнений (2), (3) [6–8]:

$$\bar{X} = A \cdot X + B \cdot U, \quad (2)$$

где \bar{X} – матрица вектор-функции зависимых переменных; A – квадратная матрица коэффициентов данных состояния; X – матрица производных зависимых переменных; B – матрица созависимых данных; U – матрица входных данных.

$$\lambda = \text{eigenvals}(A), \quad (3)$$

где λ – эквивалентное значение матрицы A .

Для двух видов контуров ФАПЧ [10], согласно матричному уравнению (2), (3), проследим тренд эквивалентов матрицы состояния, определяющих запас статической устойчивости в зависимости от длины ЛЭП с схеме с генератором с автоматическим регулированием возбуждения сильного действия (АРВ СД). Результаты представим на рис. 8.

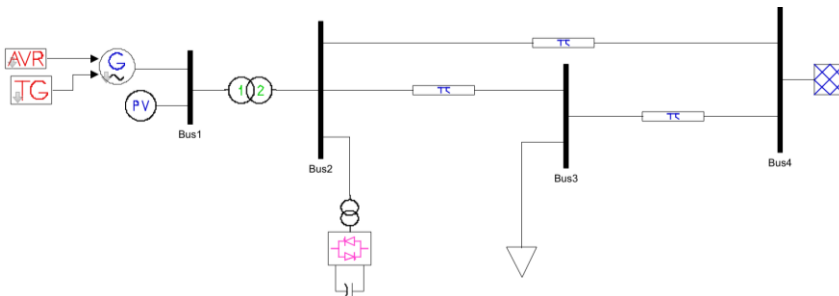


Рис. 7. Исследуемая одномашинная линейная схема энергорайона в ПК «PSAT MatLab»

Fig. 7. Single-generator linear scheme of the power system in «PSAT MatLab»

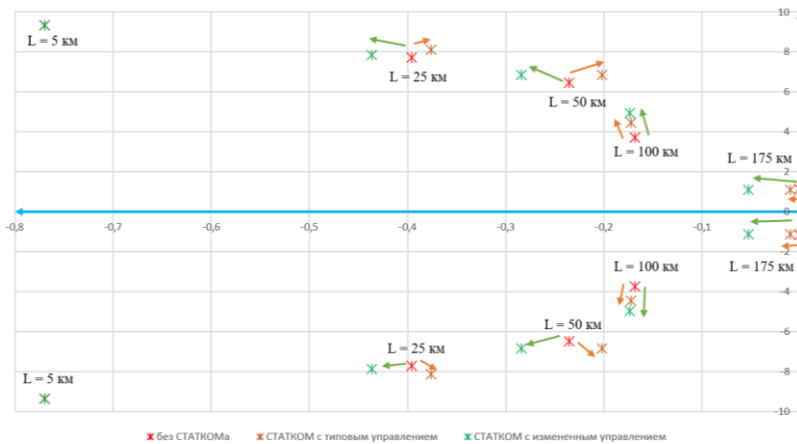
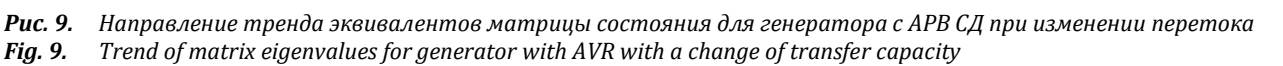


Рис. 8. Направление тренда эквивалентов матрицы состояния для генератора с АРВ СД при изменении длины ЛЭП

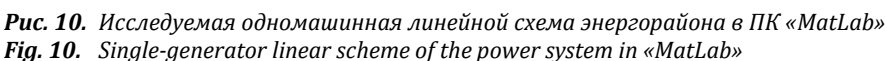
Fig. 8. Trend of matrix eigenvalues for generator with AVR with a change of line length



На основании полученных данных можем сделать вывод, что применение СТАКОМ в значительной мере повышает статическую устойчивость электрической системы, при этом коэффициент запаса устойчивости зависит от параметров и качества контура ФАПЧ.

пропускания) и определяются в первую очередь собственным движением, а также зависят от чувствительности показателей качества и устойчивости к режимным и параметрическим изменениям системы. Таким образом, режимная надежность энергообъединения может быть обеспечена лишь при наличии достаточной управляемости, определяемой возможностью целенаправленного изменения и поддержания динамических свойств всей системы за счет локального управления отдельными объектами [11].

Для оценки влияния контура ФАПЧ на динамическую устойчивость смоделируем работу заданной схемы в ПК «MatLab» (рис. 10).



Построим угловые характеристики мощности в аварийном режиме для установки мощностью 200 МВАр с типовой и предложенной системой управления (рис. 11), т. к. в данном режиме скорость синхронизации непосредственно связана со скоростью динамического отклика.

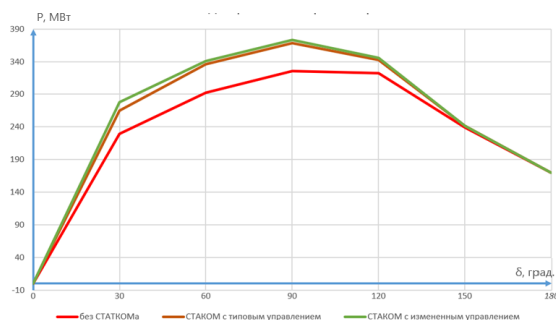


Рис. 11. Угловые характеристики мощности в аварийном режиме

Fig. 11. Power-angle characteristics in disaster mode

Таким образом, применение СТАТКОМ позволяет увеличить амплитуду угловой характеристики мощности, что уменьшает площадку ускорения генератора. В аварийном режиме предложенная система автоматического управления имеет более быстрый динамический отклик, а следовательно, и большее влияние, поэтому ее угловая характеристика располагается выше характеристики при использовании типового управления.

Заключение

Можно утверждать, что скорость синхронизации СТАТКОМ с сетью, обусловленная работой контура ФАПЧ, в значительной мере вносит вклад как в статическую, так и в динамическую устойчивость электроэнергетических систем. Само же применение устройств СТАТКОМ позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП, повысить качество электроэнергии и, как следствие, устойчивость электрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уманский И.В., Аскаров А.Б. Системы управления сетевыми инверторами по принципу «ведущий» // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 160-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 140-летию академика М.А. Усова, основателям Сибирской горно-геологической школы. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – Т. 2. – С. 245–246.
2. Горбунов А.С., Алибаев Ф.Н. Применение полупроводниковых преобразователей электрической энергии в электроэнергетике // Вестник современных исследований. – 2018. – № 8.3 (23). – С. 231–233. EDN: PGWHLN
3. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 312 с. EDN: QMLNAR
4. Виджей К. Суд. HVDC and FACTS controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах. – М.: НИП «НИИА», 2009. – 344 с.
5. Siva Prasad J.S., Prasad Kamiseti N.V., Narayanan G. Experimental comparison of power conversion loss with different PWM strategies for STATCOM application // 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020). – Cochin, India, 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070614
6. Babaei Saman, Parkhideh Babak, Bhattacharya Subhashish. Analysis of 48-pulse based STATCOM and UPFC performance under balanced and fault conditions // IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – Montreal, QC, Canada, 2012. – P. 1211–1216. DOI:10.1109/IECON.2012.6388598
7. Уманский И.В. Алгоритмы трехфазной фазовой автоподстройки частоты и применение к статическому синхронному компенсатору (statcom) // Бутаковские чтения: сборник статей IV Всероссийской с международным участием молодёжной конференции / под ред. А.С. Ивашутенко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – С. 52–55. EDN: QHEGWH
8. Fehmi Sevilmiş, Hulusi Karaca. A fast hybrid PLL with an adaptive all-pass filter under abnormal grid conditions // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 184. – 106303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106303>
9. Modeling and adaptive design of the SRF-PLL: nonlinear time-varying framework / B. Shakerighadi, E. Ebrahimzadeh, M.G. Taul, F. Blaabjerg, C.L. Bak // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 28635–28645. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972345
10. Уманский И.В., Уфа Р.А. Анализ влияния СТАТКОМ на устойчивость электроэнергетических систем // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIX Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 80-летию со дня победы в Великой Отечественной Войне. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2025. – Т. 2. – С. 174–175.
11. Kundur Prabha. Power system stability and control. – NY: McGraw Hill, 1994. – 1199 с.
12. Harinee K., Subramanian D. Padma. Small signal stability analysis of multi-machine power systems interfaced with micro grid // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – Vol. 03. – Iss. 08. – Paper ID: IJERTV3IS080275. DOI: 10.17577/IJERTV3IS080275

Информация об авторе

Игорь Владимирович Уманский, магистрант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; umansky@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5049-0820>

Поступила в редакцию: 09.09.2025

Поступила после рецензирования: 20.11.2025

Принята к публикации: 27.12.2025

REFERENCES

1. Umansky I.V., Askarov A.B. Control systems for grid inverters based on the "master" principle. *Problems of Geology and Subsoil Development. Proc. of the XXVII International Youth Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov, dedicated to the 160th anniversary of the birth of Academician V.A. Obruchev and the 140th anniversary of Academician M.A. Usov, the founders of the Siberian Mining and Geological School*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2023. Vol. 2, pp. 245–246. (In Russ.)
2. Gorbunov A.S., Alibaev F.N. Application of semiconductor converters of electrical energy in the electric power industry. *Bulletin of modern research*, 2018, no. 8.3 (23), pp. 231–233. (In Russ.) EDN: PGWHLN
3. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. *Application of flexible (controlled) AC power transmission systems in power systems*. Moscow, Torus Press, 2011. 312 p. (In Russ.) EDN: QMLNAR.
4. Vijay K. Sood. *HVDC and FACTS controllers: application of static converters in power systems*. Moscow, NP "NIIA" Publ., 2009. 344 p. (In Russ.)
5. Siva Prasad J.S., Prasad Kamiseti N.V., Narayanan G. Experimental comparison of power conversion loss with different PWM strategies for STATCOM application. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*. Cochin, India, 2020. pp. 1–6. DOI: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070614
6. Babaei Saman, Parkhideh Babak, Bhattacharya Subhashish. Analysis of 48-pulse based STATCOM and UPFC performance under balanced and fault conditions. *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, QC, Canada, 2012. pp. 1211–1216. DOI:10.1109/IECON.2012.6388598
7. Umansky I.V. Algorithms for three-phase phase-locked loop and application to a static synchronous compensator (statcom). *Butakov Readings: collection of articles from the IV All-Russian youth conference with international participation*. Ed. by A.S. Ivashutenko. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2024. pp. 52–55. (In Russ.) EDN: QHEGWH
8. Fehmi Sevilmiş, Hulusi Karaca. A fast hybrid PLL with an adaptive all-pass filter under abnormal grid conditions. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 184, 106303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106303>
9. Shakerighadi B., Ebrahimpzadeh E., Taul M.G., Blaabjerg F., Bak C.L. Modeling and adaptive design of the SRF-PLL: nonlinear time-varying framework. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 28635–28645. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972345
10. Umansky I.V., Ufa R.A. Analysis of the influence of the STATCOM on the stability of electric power systems. *Problems of Geology and Subsoil Development. Proc. of the XXIX International Youth Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov, dedicated to the 80th anniversary of the victory in the Great Patriotic War*. Vol. 2. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2025. pp. 174–175. (In Russ.)
11. Kundur Prabha. *Power System Stability and Control*. NY, McGraw Hill, 1994. 1199 p.
12. Harinee K., Subramanian D. Padma. Small signal stability analysis of multi-machine power systems interfaced with micro grid. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 03, Iss. 08, paper ID: IJERTV3IS080275. DOI: 10.17577/IJERTV3IS080275

Information about the author

Igor V. Umansky, Master Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; umansky@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5049-0820>

Received: 09.09.2025

Revised: 20.11.2025

Accepted: 27.12.2025