

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 АУТОПОДСТРОЙКИ 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].

Одним из устройств FACTS является статический синхронный компенсатор (STATCOM), используемый для регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, а также для повышения динамической устойчивости энергосистемы.

Методы синхронизации сети в целом можно разделить на две категории: синхронизация на основе напряжения и синхронизация на основе мощности. В настоящее время синхронизация на основе напряжения стала доминирующей в устройствах STATCOM, где в общей точке связи вводится ряд трехфазных систем фазовой автоподстройки частоты на основе преобразования Парка–Горева, что позволяет оценить частоту, фазовый угол и напряжение прямой последовательности. В этом контексте до сих пор было предложено несколько стратегий фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для трехфазных систем, чтобы обеспечить точное отслеживание напряжения сети с быстрым динамическим откликом [2, 3].

Наиболее популярной структурой ФАПЧ является синхронная система обратной связи или синхронная петля (SRF-PLL), которая в какой-то мере является типичной (рис. 1). Подход основан на представлении трехфазных напряжений в синхронной системе отсчета dq [4]. Как показывает ряд исследований [4–7], SRF-PLL существенно зависит от величины и изменения частоты входного сигнала и при резких изменениях может перейти в неустойчивый режим.

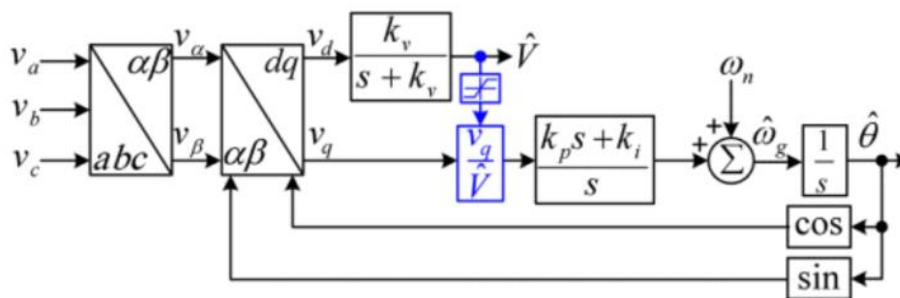


Рис. 1. Типичная трехступенчатая схема ФАПЧ

Для повышения устойчивости к вышеупомянутым возмущениям в схему может быть включен линейный фильтр напряжения («фильтр скользящего среднего» – MAF, рис. 2). MAF значительно улучшает фильтрующую способность SRF-PLL, но при этом вызывает большую задержку в контуре управления, что замедляет динамическую реакцию системы [8].

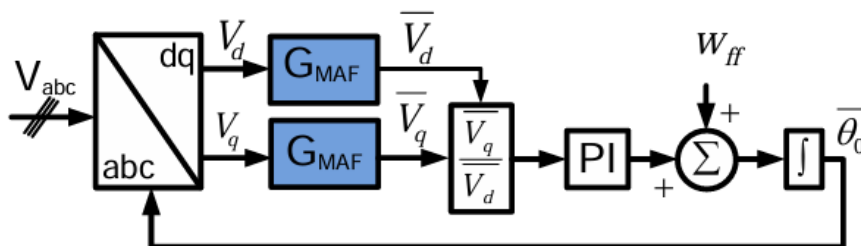


Рис. 2. Принципиальная схема MAF-PLL

Для восстановления динамического отклика установки существует ряд усовершенствованных алгоритмов MAF-PLL:

- DMAF-PLL [9] (рис. 3), представляет собой дифференциальный MAF-PLL. Две дополнительные пропорциональные составляющие (DFID и DFIQ), по сравнению с обычным MAF-PLL, включены с целью устранения низких гармонических составляющих перед подачей на вход фильтра. Это позволяет увеличить полосу пропускания фильтра и, следовательно, улучшает динамическую характеристику замкнутого контура.

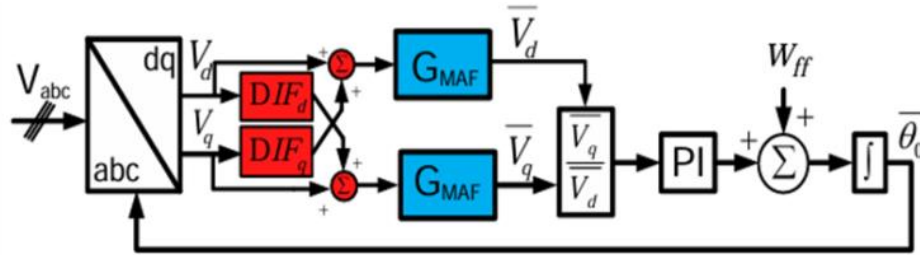


Рис. 3. Принципиальная схема DMAF-PLL

- MAF-PLL с PLC [9] (рис. 4), в котором в контур фазового детектора добавляется компенсатор фазового перехода (PLC), компенсирующий фазовую задержку, вызванную MAF, и, улучшающий динамическую характеристику.

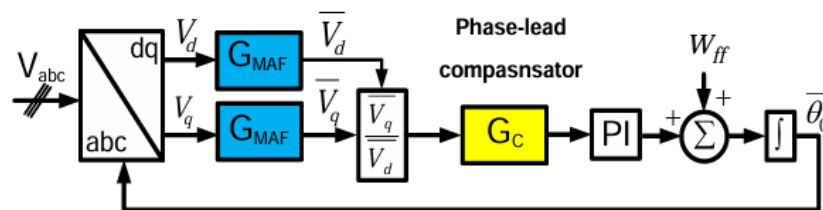


Рис. 4. Принципиальная схема MAF-PLL с PLC

- PMAF-PLL [9] (рис. 5), т. е. PLL со ступенью предварительной фильтрации на основе MAF. Этот метод удаляет блок MAF из контура фазового детектора PLL и заменяется каскадом предварительной фильтрации на основе MAF, который подается на вход PLL.

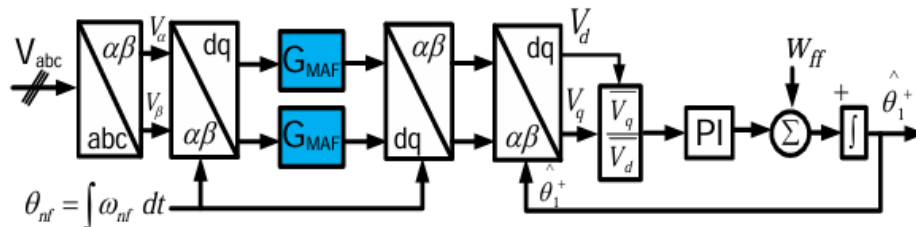


Рис. 5. Принципиальная схема PMAF-PLL

Для оценки скорости синхронизации на основе вышеприведенных алгоритмов проведено сравнительное исследование по результатам четырех экспериментов: падение амплитуды трехфазных напряжений на 50 %, падение частоты сети на 2 Гц, наложение третьей гармонической составляющей на напряжение сети, скачок фазы сети на 20°. Ознакомиться с результатами экспериментов можно в табл. 1.

На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод, что линейный фильтр напряжения (MAF) значительно снижает перерегулирование, но при этом увеличивает время фазовой автоподстройки частоты. Добавление дифференциальной составляющей в контур фазового детектора, а также применение компенсатора фазового перехода позволяют компенсировать динамическую задержку в пределах более необходимых значений, а также максимально быстро реагируют на наложение гармоник. Алгоритм со ступенью предварительной фильтрации на основе MAF (PMAF) является наиболее результативным по всем критериям сравнения: преуспевает по времени приведения к частоте 50 Гц, в большинстве экспериментов преуспевает по времени автоподстройки частоты в пределах естественных колебаний энергосистемы (49,95...50,05 Гц), показывает наименьшие показатели перерегулирования.

Таблица 1. Результаты экспериментов по сравнению алгоритмов PLL

PLL	Режим	$T_s \pm 0,1 \%$	$T_{s \text{ уст.}}$	$h_{\max}$	$h_{\min}$
SRF	номинальный	2,451	3,025	50,96	49,11
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,368	2,660	50,70	49,15
	48 Гц	2,554	2,881	–	–
	наложение третьей гармоники	–	–	–	–
	скачок фазы на 20°	2,540	2,717	50,63	49,09
MAF	номинальный	2,881	3,083	50,84	49,17
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,443	2,999	50,68	48,91
	48 Гц	2,614	3,038	–	–
	наложение третьей гармоники	2,701	–	–	–
	скачок фазы на 20°	2,771	3,121	50,65	49,23
DMAF	номинальный	2,778	3,078	50,76	49,18
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,513	3,016	50,66	48,91
	48 Гц	2,617	2,949	–	–
	наложение третьей гармоники	2,512	–	–	–
	скачок фазы на 20°	2,689	3,126	50,72	49,22
MAF PLC	номинальный	2,735	3,178	50,86	49,17
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,564	3,026	50,61	48,92
	48 Гц	2,609	2,949	–	–
	наложение третьей гармоники	2,564	–	–	–
	скачок фазы на 20°	2,766	3,111	50,61	49,22
PMAF	номинальный	2,468	2,808	50,70	49,41
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,331	2,607	50,64	49,10
	48 Гц	2,501	2,686	–	–
	наложение третьей гармоники	2,701	–	–	–
	скачок фазы на 20°	2,371	2,712	50,62	49,41

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources—An Overview // IEEE Xplore. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9181463> (дата обращения: 10.11.2024).
2. A fast hybrid PLL with an adaptive all-pass filter under abnormal grid conditions // ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620301097> (дата обращения: 10.11.2024).
3. Modeling and Adaptive Design of the SRF-PLL: Nonlinear Time-Varying Framework // IEEE Xplore. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8986569> (дата обращения: 10.11.2024).
4. Stability simulation and improvement of typical phase-locked loop of STATCOM with different equivalent grid R/L ratios // ScienceDirect. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723009459?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8dfc76413838e959#b3 (дата обращения: 10.11.2024).
5. Supplementary Control for Mitigation of Successive Commutation Failures Considering the Influence of PLL Dynamics in LCC-HVDC Systems // IEEE Xplore. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8993690> (дата обращения: 10.11.2024).
6. PLL Synchronization Stability of Grid-Connected Multiconverter Systems // IEEE Xplore. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9580602?casa_token=Nz5V2pUxjlYAAAAA:hlMRpnCNQB47LHRv5OmF-sbzayjd2Om2jQcw4COVvrJ0FAUnnqzT6EETkynKU6LSnNIWGp3Z-lU (дата обращения: 10.11.2024).
7. Practical implementation of adaptive SRF-PLL for three-phase inverters based on sensitivity function and real-time grid-impedance measurements // Energies. – URL: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/133269/Practical_Implementation_of_Adaptive_SRF_PLL.pdf?sequence=1 (дата обращения: 10.11.2024).
8. Derivation and Design of In-Loop Filters in Phase-Locked Loop Systems // IEEE Xplore. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6088010?casa_token=a8mx_WaR4QMAAAAA:aeuPndNvNcF-W0Q8txbgMWTcrRSnykeiVOVM1wRIRipHxubnqRV7LTW7Ru2IYPZsJtuG2IONw7Q (дата обращения: 11.11.2024).
9. Mohamed Mellouli, Mahmoud Hamouda, Jaleddine Ben Hadj Slama A Comparative Study and Evaluation of Improved MAF-PLL Algorithms // International journal of renewable energy research. – 2017. – V. 1. – P. 7.