

УДК 620.92+502.174.3

ХАРАКТЕРИСТИКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Imad Elzein, Петренко Ю.Н.

Lebaneze International University, Lebanon, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, ypetrenko@bntu.by

Актуальности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), наиболее распространенными из которых являются гидростанции, ветрогенераторные установки, биогенераторы и солнечные элементы уделяется все возрастающее влияние.

Следует отметить одну интересную особенность-среди перечисленных каждый источник (вид) является уникальным в своем роде, не перекрывая свойства другого. Среди названных особое положение занимает солнечная энергетика (СЭ) благодаря своим уникальным свойствам-неисчерпаемости (в пределах существования солнечной системы) и общедоступности (в пределах географических характеристик данной местности). Более того, СЭ является практически единственным источником энергии для космических аппаратов в пределах земного притяжения и за его пределами.

Судя по многочисленным публикациям, СЭ является притягательной как для стран с жарким климатом, так и для стран, расположенным далеко от экватора, таких как Россия, Канада, США, Германия, Австралия. В ряде случаев определяющими факторами являются забота об окружающей среде и особенность (труднодоступность) местности, что характерно, например, для Аляски, Тибета и Антарктиды. Большой размах наблюдается также в диапазоне установленной мощности: имеются примеры мегаваттных фотоэлектрических солнечных станций (ФЭС), занимающих значительные площади, и тех, которые обеспечивают энергией дорожные знаки. Устройства катодной защиты трубопроводов часто используют ФЭС, как безальтернативное решение. Солнечные панели все чаще используются как конструктивные элементы стен и крыш жилых и общественных зданий.

Концепция «Умный дом» в значительной мере также строится на основе ФЭС.

Серьезным препятствием широкому использованию СЭ является низкий КПД преобразования и высокая стоимость солнечных элементов. Эти два фактора являются мощным стимулом работам, позволяющим извлечь(обеспечить) максимально возможную величину мощности при имеющихся в данный момент условиях окружающей среды и при заданных параметрах солнечных элементов, определяемых предприятиями-изготовителями [1-4]. Фотоэлектрический модуль, как набор фотоэлектрических элементов, соединенных последовательно-параллельно, имеет нелинейную внешнюю характеристику, Рис.1, вид которой зависит от атмосферных условий, с уникальной характерной точкой максимума выходной мощности (МВМ) [1].

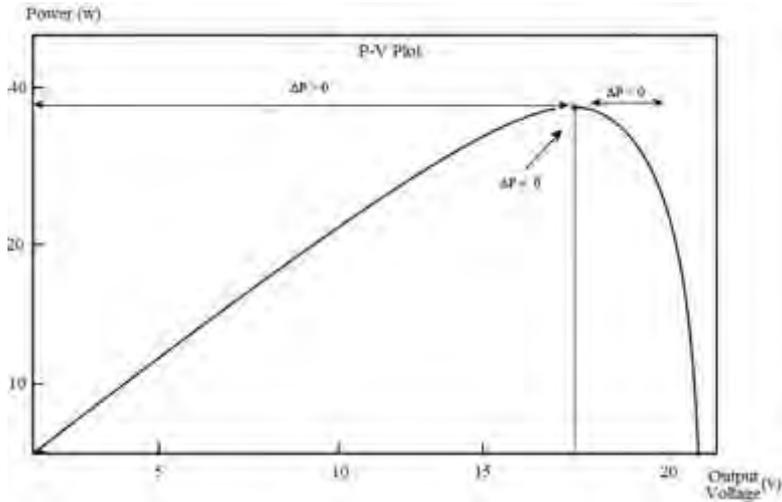


Рисунок 1 – Внешняя характеристика солнечной батареи в координатах «Мощность-напряжение»

Интерес представляет также характеристика в координатах «Ток- напряжение», рисунок 2.

Приведенные характеристики показывают, что наиболее актуальными являются вопросы управления режимом работы ФЭС, при котором имеет место наибольшая генерируемая мощность при изменяющихся внешних воздействиях –уровня солнечной радиации и температуры окружающей среды [5,6].

Эффективность автоматического управления определяется обоснованным выбором алгоритма управления и математическим аппаратом его реализации. Для компенсации отклонения применяется преобразователь постоянного тока в постоянный, разработанная математическая модель которого учитывает его гибридные свойства [7,8,9].

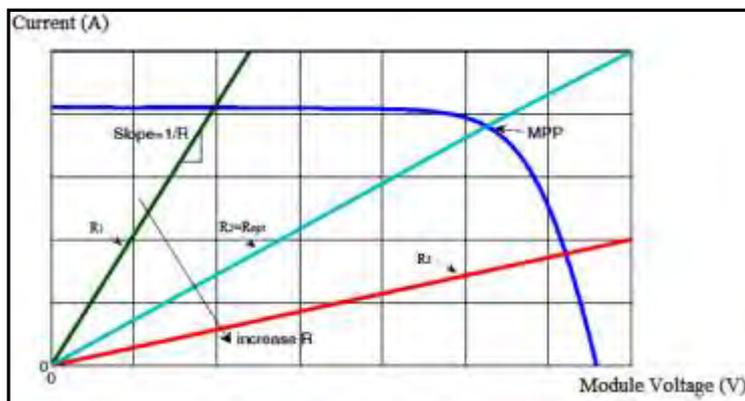
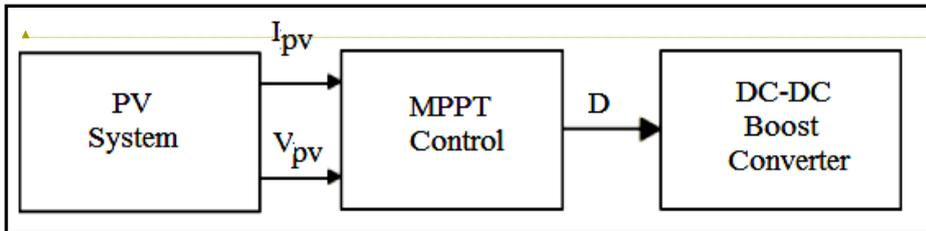


Рисунок 2 – Характеристика солнечной батареи в координатах «Ток-напряжение» при различных значениях нагрузки.

Укрупненная структурная схема управления приведена на Рис.3, на котором в блоке «MPPT Control» вырабатывается требуемый сигнал скважности прямоугольных импульсов D , фактически регулирующий напряжение на выходе солнечной батареи (СБ). Это приводит к смещению рабочей точки (Рис.1) и задачей является ее удержание в точке, соответствующей максимальной мощности.



Отформатировано: Шрифт: (по умолчанию) Times New Roman, 12 пт, Цвет шрифта: Текст 1

Рисунок 3 – Укрупненная структурная схема управления СБ

Для компенсации отклонения применяется преобразователь постоянного тока в постоянный, разработанная математическая модель которого учитывает его гибридные свойства [7,8,9], рис.4.

Наиболее актуальными являются вопросы управления режимом работы ФЭС, при котором имеет место наибольшая генерируемая мощность при изменяющихся внешних воздействиях – уровня солнечной радиации и температуры окружающей среды [5,6].

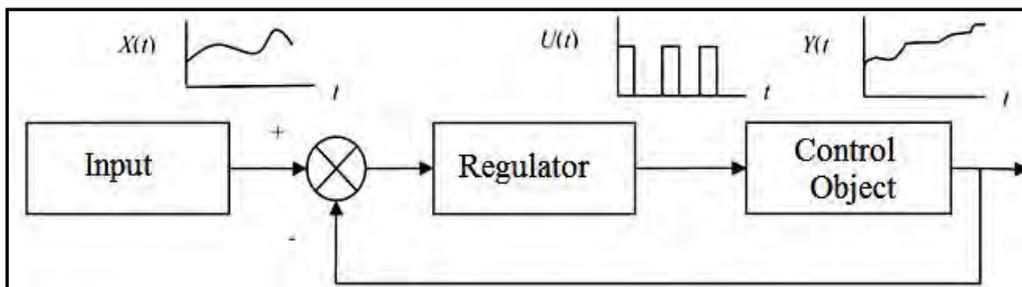


Рисунок 4 – Преобразователь постоянного тока, как гибридная система

Эффективность автоматического управления определяется обоснованным выбором алгоритма управления и математическим аппаратом его реализации. На основе анализа имеющихся альтернатив в области систем искусственного интеллекта (Алгоритмы оптимизации на основе муравьиной колонии, Системы нечеткой логики), предложено создание агента нечеткой логики, отличающегося от традиционного нечеткого регулятора учетом нелинейной несимметричной зависимости генерируемой мощности от атмосферных условий, что выражается в переменном шаге генерирования функций

принадлежности нечеткого регулятора и их зависимости от области управления, разделяемой точкой максимальной мощности [10,11,12].

Характеристика методов МРРТ и их классификация.

Переходя к общей характеристике алгоритмов МРРТ необходимо прежде всего отметить их большое разнообразие главным образом по способам получения сигнала отклонения от точки максимальной мощности. [1-7].

Простейший алгоритм основан на измерении переменных-тока и напряжения и вычислении на этой основе сигнала мощности. Недостаток этого алгоритма заключается в относительно больших аппаратных затратах: требуются датчики тока и напряжения и аппаратный умножитель аналоговых величин в реальном времени. При переходе к цифровой форме преобразования сигналов картина практически не изменяется в отношении временных затрат.

Более сложные алгоритмы не связаны непосредственно с вычислением величины мощности в интервале наблюдения, а лишь с ее относительным изменением. Среди них наиболее привлекательными по целому ряду факторов являются P&O (Perturbation and Observation), Increment Conductance (IncCond) and Hill Claiming (HillCl) [1,2,3]. Они также отличаются по степени сложности, наличию сенсоров, стоимостью реализации, диапазоном измерений и популярности в смысле применения. Главное их достоинство заключается в простоте и легкости реализации.

P&O метод предусматривает фиксацию отклонения напряжения характеристики рабочей точки, в то время как HillCl основан на отклонении скважности DC-DC преобразователя.

В тоже время метод P&O не обеспечивает достаточную точность слежения, поскольку не предусматривает сравнения фактического напряжения на выходе PhV модуля с напряжением точки в точке максимальной мощности, поскольку изменение мощности рассматривается косвенно как результат отклонения напряжения, Рис.1. Результатом является низкая точность, из-за непрерывных колебаний вблизи точки максимума, что приводит к потере энергии.

Минимизируя шаг отклонения можно добиться уменьшения колебаний, но в тоже время малые отклонения приводят снижению скорости отслеживания точки МРР.

Общим недостатком перечисленных методов является потеря работоспособности при резких изменениях уровня солнечной радиации.

Следующим методом, входящим в «топ 3» по популярности является метод инкрементальной проводимости Incremental Conductance (IncCond). В источниках [1-3] было предложено несколько модификаций этого метода. Метод IncCond в целом имеет высокую эффективность и поэтому предлагаемые модификации увеличивают сложность и стоимость системы не увеличивая заметно его эффективность. Среди фундаментальных алгоритмов МРРТ INC-алгоритм полагается, главным образом, на тангенциальное значение рабочей точки на P-V характеристики, что является основой для прогноза необходимого направления движения к точке максимальной мощности (МВМ). При этом

наиболее простой алгоритм с фиксированным шагом приращения обеспечивает стабильность перемещения рабочей точки ценой медленной реакции при наличии возмущения параметров окружающей среды T и G и/или наличия возмущений в виде шума.

Другой популярный алгоритм МРРТ Р&О (возмущение и наблюдение), обеспечивает многократное приращение напряжения для перемещения рабочей точки в направлении МВМ. Р&О алгоритм не требует операции нахождения производной и, следовательно, более прост в реализации. Однако стандартный Р&О алгоритм имеет те же проблемы, что и алгоритм INC, в котором скорость отслеживания должна быть принесена в жертву, чтобы повысить эффективность МРРТ, и подавить установившиеся колебания [9].

В качестве доказательства приведем возможные перемещения рабочей точки в режимах S1-S6, Рис.5 при работе алгоритма Р&О.

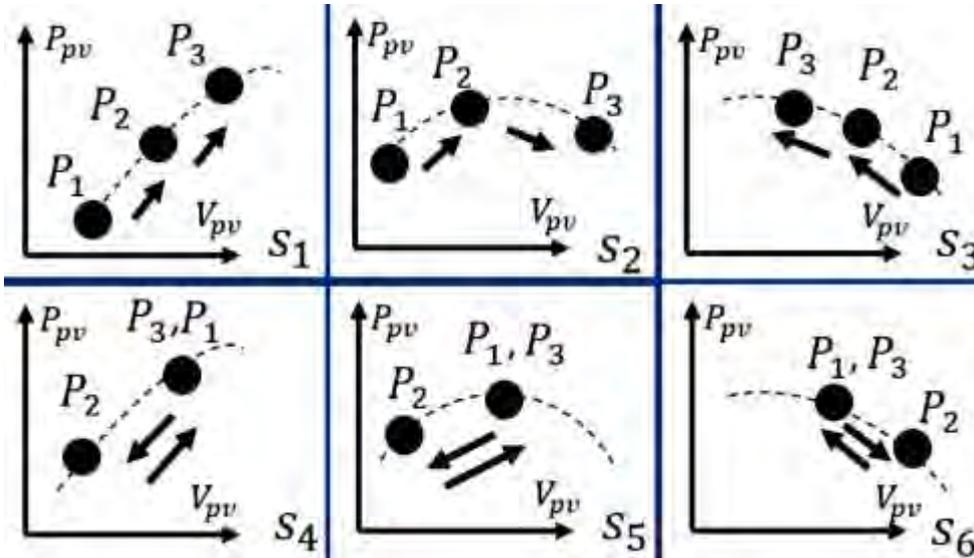


Рисунок 5 – Траектория рабочей точки при использовании алгоритма Р&О

Например, Режим S1 состоит из нескольких шагов: 1-увеличение напряжения ($V+$); 2-рабочая точка перемещается из P_1 в P_2 ; 3-наблюдается увеличение мощности $P+$; 4- $V+$ (увеличение напряжения, поскольку предыдущий шаг был успешным); 5-перемещение P_2 в P_3 . При таком подходе иногда, в особенности вблизи точки максимума, режим S4, система реагирует неверно.

В режимах S4-S6 возможно периодическое увеличение-уменьшение мощности. Траектория вблизи точки максимума приведена на Рис 6, где имеют место колебания $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ и $P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 - P_2$ и т.д.

На основании сказанного следует вывод, что классический P&O алгоритм с постоянным шагом не обеспечивает работу с максимальной мощностью.

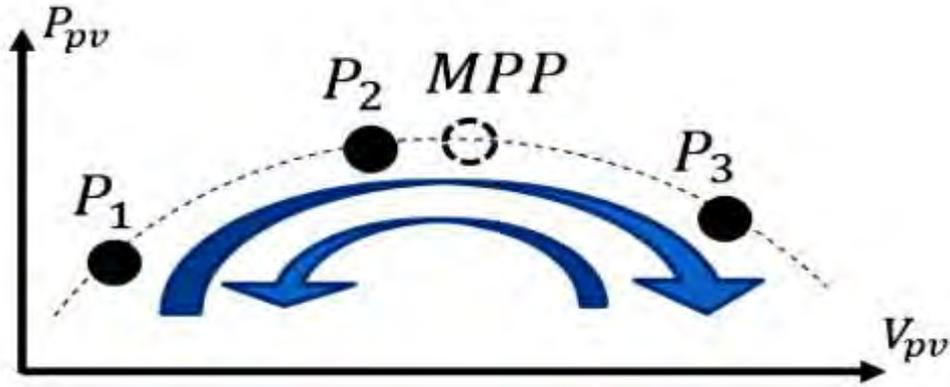


Рисунок 6 – Траектория движения вблизи точки максимальной мощности

Предложенный алгоритм, который представлен в [10], основан на известном алгоритме P&O, в котором для формирования шага применяется контроллер нечеткой логики с адаптивным переменным шагом распределения (КНЛ-А) функций принадлежности (ФП). Основанием для распределения ФП является нелинейная несимметричная характеристика P-V, изображенная в новом варианте на Рис. 7:

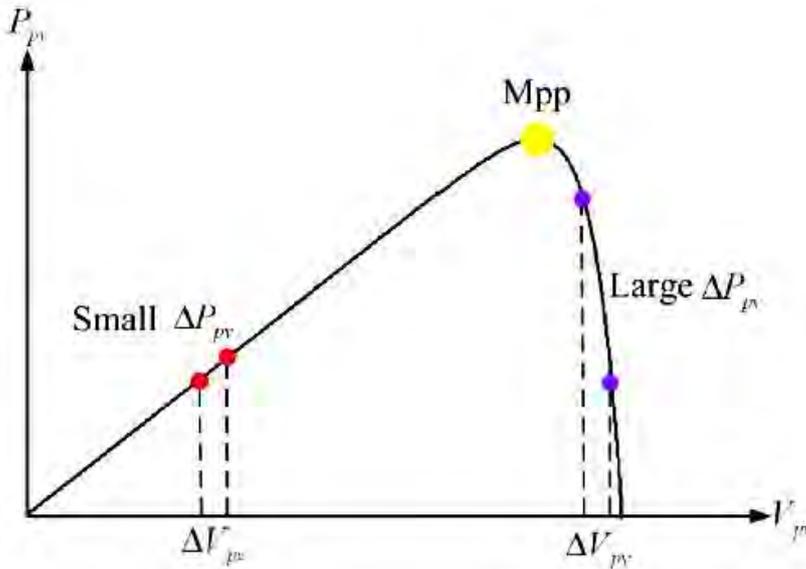


Рисунок 7 – Концепция предложенного несимметричного адаптивного алгоритма нечеткой логики

Блок-схема предложенного адаптивного алгоритма Р&О с переменным шагом приведена на рис. 8; для обычного Р&О (слева) и адаптивного нечеткого Р&О (справа), который реализован в этом исследовании с новым нечетким выводом.

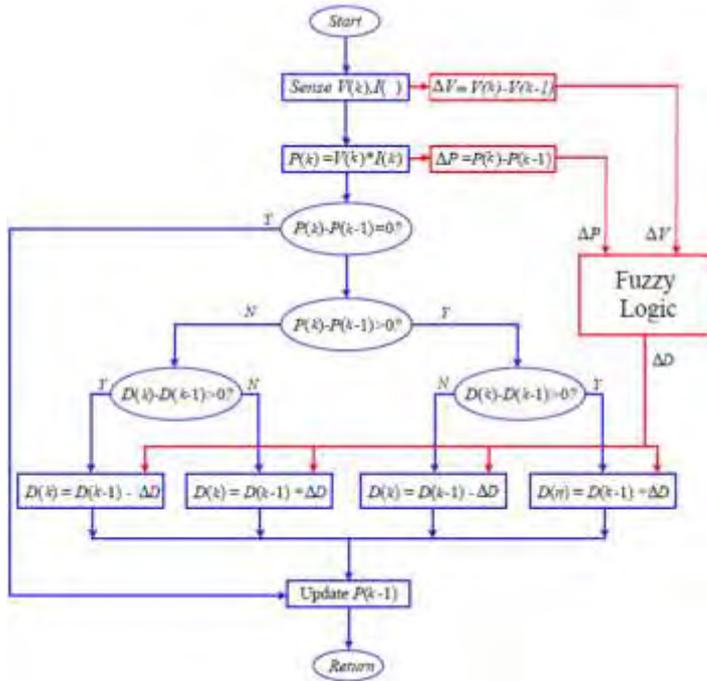


Рисунок 8 – Блок-схема предложенного алгоритма на основе контроллера нечеткой логики

Адаптация заключается в учете нелинейности характеристики и ее несимметричности относительно точки МВМ, рис.7.

Пояснение функционирования контроллера нечеткой логики приведено на рис.9.

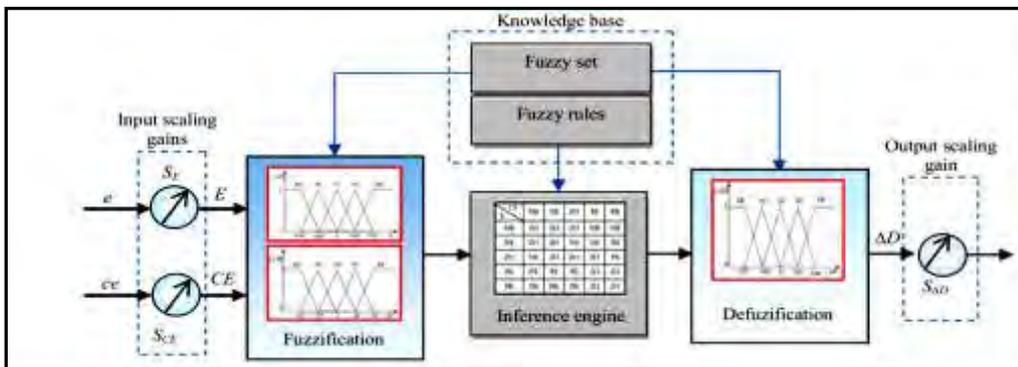


Рисунок 9 – Переменные управления МВМ в терминах нечеткой логики

Обилие методов обеспечения максимальной выходной мощности стимулирует исследования их сравнительного анализа, чему посвящено множество работ. В большинстве из них неоправданно связывается алгоритм поиска сигнала отклонения от режима максимальной мощности и способ выработки управляющего воздействия на DC-DC контроллер, которое устраняет это отклонение. В этом смысле теряется направление поиска пути совершенствования системы: либо искать пути совершенствования алгоритма либо необходимо оптимизировать контроллер. И первый и второй пути предлагают значительное разнообразие решений.

Предложен новый подход к классификации алгоритмов управления, заключающийся в том, что разделены этапы (режимы) поиска отклонения уровня мощности от максимального значения и этап устранения этого отклонения.

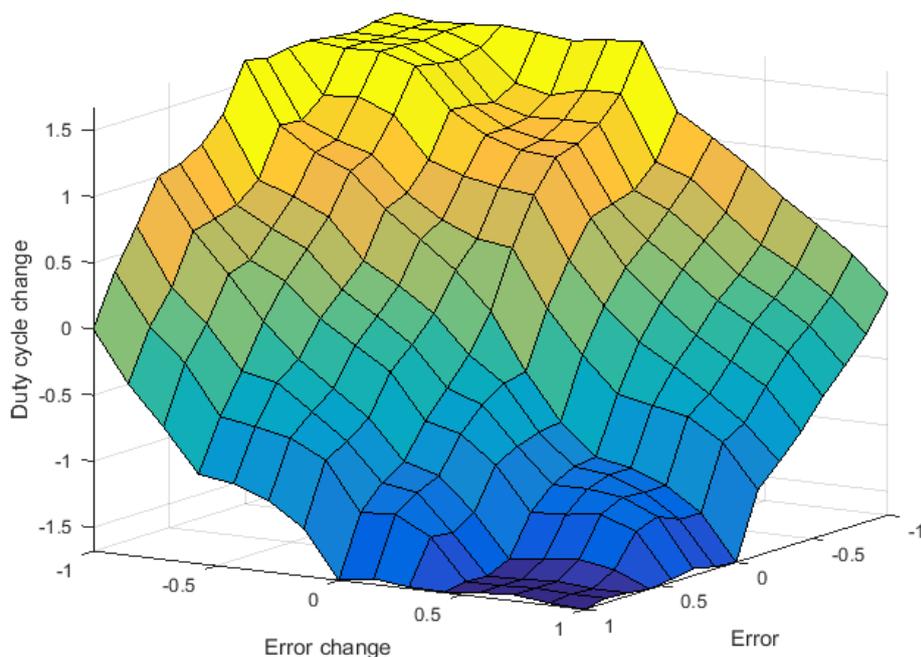


Рис. 10 – Поверхность входов и выхода модернизированного контроллера нечеткой логики

Итак, при рассмотрении методов MPPT и их классификации целесообразно выделить алгоритмы получения сигнала рассогласования от точки ММ и подачи этого сигнала на исполнительный контроллер, задачей которого является устранение этого рассогласования, т.е. сведения ошибки к нулю; это могут быть контроллеры P, PI, PID, контроллеры нечеткой логики и иные.. Следует отметить, что ряд специалистов

подчеркивает, что контроллеры класса PID, хорошо проявившие себя для линейных систем, работают несовершенно в нелинейных системах, каковыми являются PhV stations.

На основе анализа многочисленных публикаций просматривается следующая структура системы MPPT, состоящая из трех обособленных функциональных узлов: - идентификация отклонения от точки максимальной мощности – способ а (метода регулирования) устранения отклонения и исполнительного орган-силовой преобразователь, реализующего устранение рассогласования.

Под эту классификацию не подпадают аналитические методы, позволяющие вычислить необходимое воздействие, как правило это величина напряжения.

Таким образом, при одном и том же способе нахождения рассогласования, например Sliding Mode, можно реализовать систему на основе PI-controller, или Fuzzy Logic controller or Particle Swarm controller и так далее, применив при этом один из силовых преобразователей: DC-DC Buck, Cook, SEPIC Converter etc.

Классификация, построенная по предложенному принципу, приведена на рис.11. Следует отметить, что выбор средств реализации из числа приведенных на рис.11 может быть обоснован целым рядом факторов, например навыками программирования, владением того или иного математического аппарата и/или элементной базы.

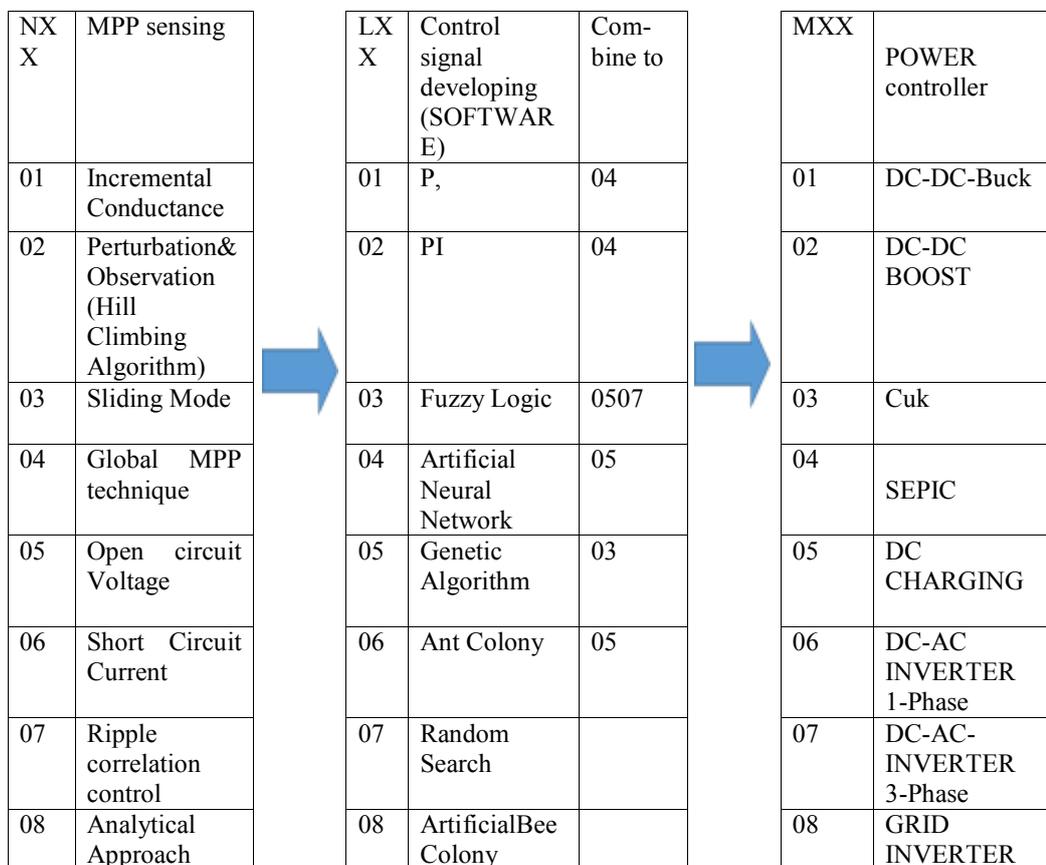


Рисунок 11 – Классификация алгоритмов управления ФЭС

ВЫВОДЫ

1) Исследование наиболее популярных методов управления МВМ, включая P&O и INC, показали их неспособность отследить МВМ при быстро изменяющихся погодных условиях.

Этот недостаток устраняет адаптивный регулятор управления на основе нечеткой логики (FLC), который позволяет корректировать управление при изменении погодных условий (температура, солнечная радиация) и устраняет автоколебания вблизи точки МВМ.

2) Предложена методика проектирования контроллера МВМ, заключающаяся в том, что на основе асимметричной зависимости P-V солнечной батареи предложен асимметричный закон распределения функций принадлежности контроллера нечеткой логики, что уменьшило время отклика и обеспечивает более точные результаты.

3) Предложенный контроллер нечеткой логики подтвердил свою работоспособность при наличии шумового воздействия по каналам интенсивности солнечного излучения и температуры в отличие от контроллера класса PD.

4) Предложена новая классификация алгоритмов обеспечения максимальной выходной мощности фотоэлектрической станции, отличающаяся разделением задачи на два этапа:

5) Выявления сигнала рассогласования переменной (ток, напряжение) от уровня максимальной мощности выработки воздействия для устранения этого рассогласования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nevzat Onat. Recent Developments in Maximum Power Point Tracking Technologies for Photovoltaic Systems. *International Journal of Photoenergy*, vol. 2010, Article ID 245316, 11 pp., doi:10.1155/2010/245316
2. T. Esmar, P. L. Chapman. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, 2007, pp. 439–449,
3. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli. «A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, 2009, pp. 4473–4482.
4. Трещ, А. М. Система управления фотоэлектрической установкой при автономном использовании / Ю. Н. Петренко, А. М. Трещ // *Наука и техника. Межд. научно-технической журнал*. Минск 2013, № 1. С. 53–56.

5. Elzein, I., Fuzzy logic controller implementation for photovoltaic station / I. Elzein, Y. N. Petrenko // System Analysis and Applied Information Science,-2014.-№4, P. 44–48.
6. Elzein, Imad. Maximum Power Point Tracking System for Photovoltaic Station: a Review./Imad Elzein, // System Analysis and Applied Information Science.-2015.-№3,-P.15–20.
7. Mathematical modeling of hybrid electrical systems/ Imad Elzein [et al.] // Science and Technology. - 2016. - №4,-P. 322-328.
8. Impulse control hybrid electrical system/ Imad Elzein [et al.] // System Analysis and Applied Information Science,- 2016. - №4, -P. 46-52.
9. Elzein, Imad. An Evaluation of Photovoltaic Systems MPPT Techniques Under the Characteristics of Operational Conditions./ Imad Elzein, Y.N.Petrenko// System Analysis and Applied Information Science.-2017.- №2, P. 30 – 38.
10. 7-A Elzein, I. Fuzzy Logic Controller Design for Photovoltaic System / I. Elzein, Y. N. Petrenko// Information Technologies and Systems 2014 (ITS 2014), Proceedings of the Int. Conf.(BSUIR, Minsk, Belarus, 29th October, 2014/редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]-Минск, 2014, С.36–37.
11. Elzein, I. A Survey on Hybrid Modeling and Control Approach of DC-DC Converters/ I. Elzein, Y. N. Petrenko// Information Technologies and Systems 2016 (ITS 2016), Proceedings of the Int. Conf., Minsk, Belarus, 26 th October, 2016)/ редкол.: Л.Ю. Шилин [идр.]-Минск, 2016.-С. 34–35.
12. Elzein, I., An Integration of A Predictive Control Model and MPPT for PV Station./Imad Elzein, Y. N. Petrenko// International Conference on Smart Systems and Technologies, Osijek, Croatia. IEEE Trans. ISBN: 978-1-5090-3718-6., P. 275-280, 2016.
13. Elzein, Imad. Adapting Model Predictive Control for a PV Station and Evaluating two different MPPT Algorithms P&O and FLC/ Imad Elzein, Y. N. Petrenko// Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ), 2015, Vol. 2, No.3, P.741-748
14. I. A. Elzein, Y. N. Petrenko. A study of maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using a fuzzy logic controller. WIT Transaction on Engineering Sciences, vol. 96, WIT Press, 2014, pp. 409–419.
15. Mathematical modeling of hybrid electrical systems/ Imad Elzein [et al.] // Science and Technology. - 2016. - №4,-P.322-328.
16. Impulse control hybrid electrical system/ Imad Elzein [et al.] // System Analysis and Applied Information Science,- 2016. - №4, -P. 46-52.