

УДК 621.316

**Зеленьевич А.И., к.т.н., доцент, Збродыга В.М., к.т.н., доцент
Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск**

**Дерюгина Е.А., к.т.н., доцент, Калечиц В.Н., к.т.н.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ
ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВО ВРЕМЕНИ РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Современные тенденции в электроэнергетике характеризуются ростом доли нелинейных и динамически изменяющихся во времени нагрузок. Примерами таких нагрузок являются зарядные станции электромобилей, промышленные преобразователи, дуговые печи, мощные электроприводы. Их работа сопровождается быстрыми изменениями потребляемой мощности, что приводит к появлению фликера напряжения, несимметрии напряжений, увеличению гармонических искажений, увеличению величины реактивной мощности, импульсным колебаниям мощности, кратковременным провалам и всплескам напряжения. Перечисленные явления ухудшают электромагнитную совместимость оборудования, вызывают дополнительный нагрев электрооборудования и снижают срок службы чувствительных потребителей.

Для анализа и оценки воздействия резкопеременных нагрузок используют спектральные методы, преобразование Фурье и вейвлет-анализ, позволяющие выделить временные и частотные компоненты возмущений.

Для снижения влияния таких нагрузок используют: пассивные методы компенсации (LC-фильтры, синхронные компенсаторы), обладающие простотой, надежностью, низкой стоимостью, но ограниченной полосой компенсации и неэффективностью при изменяющемся спектре нагрузок; активные методы компенсации (активные фильтры (AF), гибридные фильтры (HAPF) обладающие высокой динамичностью, адаптивностью к изменению спектра возмущений, но и высокой стоимостью при ограниченной мощно-

сти; энергетические накопители (батарейные, суперконденсаторные, маховиковые), способные временно принимать или отдавать энергию, компенсируя резкие изменения нагрузки; интеллектуальные системы управления нагрузкой (системы управления спросом (Demand Response) и «умные» электросети (Smart Grid), которые позволяют динамически регулировать режим работы потребителей); использование прогнозирующих алгоритмов и цифровых двойников которое позволяет прогнозировать пиковые нагрузки и заранее регулировать мощность; использование методов искусственного интеллекта (нейронные сети, регрессия, прогнозирование на основе временных рядов) для адаптивного управления компенсаторами и фильтрами.

Для оценки воздействия резкопеременных нагрузок на показатели качества электроэнергии в электроэнергетических системах используется имитационное моделирование в различных средах, например, MATLAB/Simulink.

Для проведения вычислительного эксперимента в системе MATLAB/Simulink сознана модель электрической сети 0,4 кВ для анализа влияния изменяющейся во времени нагрузки на показатели качества электроэнергии. Модель включает в себя трёхфазный силовой трансформатор 10/0,4 кВ с номинальной мощностью 400 кВА, линию электропередачи длиной 100 м, нагрузку в виде зарядной станции электромобилей, характеризующуюся резкопеременным потреблением активной мощности в диапазоне от 10 до 100 кВт, активный фильтр и батарею конденсаторов в качестве компенсирующих устройств.

Предварительная оценка результатов моделирования показывает следующее:

- без компенсации наблюдаются провалы напряжения до 8% от номинального при изменении нагрузки на 80 кВт в течение 0,5 с; коэффициент гармонических искажений (THD) достигал 12%.
- при установке пассивного фильтра наблюдается снижение THD до 6%, однако эффект ограничен из-за фиксированной частотной настройки фильтра.
- при применении активного фильтра уровень THD снизился до 2,5%, колебания напряжения уменьшились до 1,5%.

Использование гибридной системы из активного фильтра и конденсатора позволило достичь лучших результатов:

THD < 2%, стабилизация напряжения в пределах ±1%, улучшение коэффициента мощности до 0,98.

На основе результатов моделирования проведена сравнительная оценка потерь электроэнергии и устойчивости системы.

Потери в линии при установке компенсаторов снизились на 8–10%. Уровень несимметрии токов уменьшился с 6% до 1,2%. Время переходных процессов после скачка нагрузки сократилось в 3 раза.

Таким образом, активные и гибридные компенсаторы оказываются наиболее эффективными в динамических условиях, особенно в сочетании с предиктивным управлением, основанным на моделях цифрового двойника.

Для зарядных станций электромобилей рекомендуется использование гибридных фильтров с активной частью на базе IGBT-инвертора мощностью не менее 10–15% от номинальной мощности нагрузки. Суперконденсаторные накопители целесообразно включать при изменении активной мощности более чем на 20% в течение 0,5 с. Контроль параметров показателей качества электроэнергии следует осуществлять в режиме реального времени с применением цифрового двойника и алгоритмов предиктивного анализа. Для малых промышленных предприятий оптимально применение модульных компенсаторов, объединяющих функции фильтрации и коррекции коэффициента мощности.

Заключение

Резкопеременные нагрузки являются одним из существенных факторов ухудшения показателей качества электрической энергии, особенно в распределительных сетях 0,4–10 кВ.

Комплексное применение активных фильтров и накопителей энергии обеспечивает наилучшее качество электроэнергии при динамически изменяющейся нагрузке.

Цифровые двойники электрических сетей позволяют проводить прогнозирование поведения систем в реальном времени и оптимизировать параметры компенсаторов.

Интеллектуальные алгоритмы управления (на основе нейросетей, нечеткой логики, предиктивного контроля) способны адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать стабильность сети.