

УДК 621.316

Зеленькевич 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 создана 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 наилучших результатов:

$\text{THD} < 2\%$, стабилизация напряжения в пределах $\pm 1\%$, 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.