**Алгоритм оптимизации симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ при распределенной нагрузке вдоль линии**

Лыу Куок Кыонг, Маклецов А.М., Максимов В.В., Галиев И.Ф.

В электрических 3-х фазных сетях при наличии однофазных нагрузок всегда присутствует их несимметрия, т.е. токи (мощности, напряжения) оказываются неодинаковыми в разных фазах. Это объясняется непредсказуемым временем включения (отключения) отдельных потребителей (например, бытовых электроприемников). Несимметрия нагрузок отрицательно сказывается на работе потребителей и электрической сети, в основном, по следующим причинам:

* Неодинаковая загрузка фаз ЛЭП. На рис. 1 представлены постоянные и неодинаковые суточные нагрузки трех фаз (IA, IB, IC) – режим 1 и средняя Iср, если все три фазы нагружены одинаково – режим 2.
* 

Рис.1. Фазные и средний токи линии

Следует отметить, что без учета потерь электроэнергия, передаваемая по ЛЭП в обоих режимах одинакова, если принять равенство:

I ср= 1/3 (IA+IB+IC).

Предположим,что активное сопротивление линии R=1 Ом (для упрощения расчетов). Тогда потери мощности в ЛЭП при неодинаковых токах в фазных проводах

*.*

В режиме 2 потери мощности

.

Неравенство выполняется всегда, как и в случае выравнивания графиков нагрузки передающих элементов электрических сетей [1].

* Наличие дополнительных потерь электроэнергии в нулевом проводе. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе отсутствует;
* Наличие дополнительных потерь в электродвигателях из-за появления вращающегося электрического поля обратного направления;
* Наличие дополнительных потерь в трансформаторах из-за замыкания потоков нулевой последовательности через бак и крышку трансформатора.

Дополнительные потери электроэнергии от несимметрии нагрузок могут составлять до 30% от общих потерь [1].

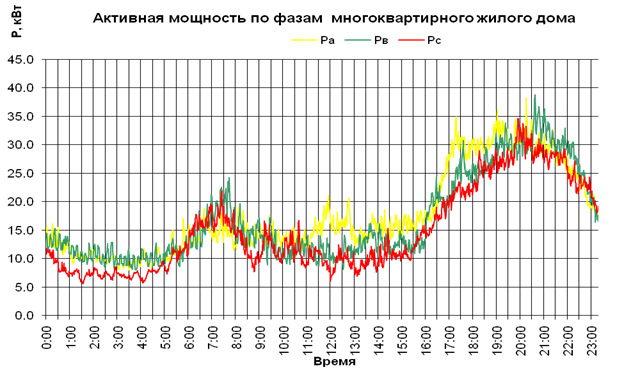
Кроме того, несимметрия нагрузок может привести к недопустимому снижению напряжения сильно нагруженных фаз, регламентируемом ГОСТ 321144-2013 [2] что вызывает жалобы потребителей на качество электроэнергии. Финансовые риски в работу сетевых предприятий вносят обрывы нулевого провода при наличии несимметрии нагрузок.

Таким образом, симметрирование нагрузок сетей 0,4 кВ является актуальной задачей, что отражено и в руководящих документах электросетевых предприятий, например [3]-мероприятие1.10 «Выравнивание нагрузок фаз в электрических сетях 0,38 кВ».

Однако задача смимметрирования нагрузок оказывается достаточно сложной, решение которой требует новых методологических подходов и применения новых технических устройств.

На рис.2 представлен пофазный суточный график нагрузки многоквартирного типового жилого дома в г. Казани. График был получен при суточном мониторинге нагрузок прибором для измерения показателей качества электроэнергии (RESURS UF). Анализ графика позволяет сделать следующие выводы:

1. До внедрения интеллектуальных устройств измерения передачи и обработки информации о параметрах режима электрических сетей информацию о несимметрии нагрузок эксплуатационный персонал электроснабжающих организаций получал, как правило, 2 раза в год в дни контрольных замеров (один день в июне и один день в декабре), что приводило к редкому, часто несвоевременному и неправильному симметрированию нагрузок. Определить наиболее нагруженную фазу во время контрольных замеров (6 раз в сутки, 2 раза в год) однозначно можно только при значительной разнице фазных токов.
2. Определить степень несимметрии нагрузки и необходимость ее симметрирования возможно с помощью интегрирующих приборов -интеллектуальных счетчиков электроэнергии, устанавливаемых у каждого потребителя. В электрических сетях РТ установлено уже несколько тысяч таких счетчиков. При этом программное обеспечение высшего уровня позволит определить нагрузки фаз, пропорциональные потребленной за неделю электроэнергии с учетом выходных дней.
3. Во время включений-отключений отдельных мощных потребителей наблюдаются «пиковые» нагрузки (разгрузки) длительностью от нескольких минут до 1 часа.

Рис.2.Пофазный суточный график нагрузки многоквартирного жилого дома.

Для снижения влияния несимметрии нагрузок на потери электроэнергии и ее качество в электрических сетях наиболее часто применяется следующее:

1. Симметрирование режимов путем переключения оперативным персоналом нагрузок с наиболее загруженных фаз на менее загруженные;
2. Применение трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда зигзаг» (Y/Zн);
3. Применение симметрирующих устройств, например, трансформаторов с симметрирующими обмотками (ТМГсу). [4].
4. Автоматические переключающие устройства ограниченной мощности.[5]

Для оценки целесообразности симметрирования ряд авторов предлагает использовать коэффициент добавочных потерь [1]. Однако указанная методика не учитывает характер распределения нагрузки вдоль ЛЭП и вносит в расчеты потерь существенную погрешность [6].

В настоящее время алгоритм симметрирования (выбора мест переключения нагрузок на другие фазы) основан исключительно на опыте оперативного персонала. Математически сформулировать задачу оптимизации симметрирования очень сложно из-за ступенчатости изменения токов по фазам при переключениях, например, нагрузка 5А переключается с фазы А на фазу С. При этом целевая функция – потери электроэнергии прерывиста и недифференцируема.

В данной работе предлагается алгоритм оптимизации симметрирования с использованием мониторинга показаний счетчиков у каждого потребителя с частотой опроса 10 мин (ГОСТ 321144-2013). Мониторинг счетчиков у потребителей и счетчиков в начала ЛЭП позволяет контролировать потребление электроэнергии, как с частотой 10 мин., так и интегрированные потери для определения средних нагрузок фаз. Для расчета потерь в четырехпроводной сети с помощью математической модели «Матлаб» была разработана специальная программа «Симметрия». Расчеты проводились для ВЛ 0,4 кВ стандартной длины (600 метров, 15 опор). На рис.3 приведены результаты расчетов с поочередным переносом несимметричной нагрузки (Iа= 2,99А, Ib=1,27 А, Iс=0,84 А) с опоры №15 до опоры №9.



Рис.3. Потери мощности при наличии несимметричной нагрузки на разных опорах ЛЭП.

Расчеты показали, что чем ближе несимметричная нагрузка к концу ЛЭП, тем больший эффект дает симметрирование. Поэтому оперативному персоналу при выполнении операции симметрирования необходимо начинать ее с конца ЛЭП.

Наличие постоянного мониторинга режима и возможность программного прогнозирования режимов при различных вариантах симметрирования также позволяют оперативному персоналу выбирать оптимальный вариант переключения фазных нагрузок. На рис. 4 в качестве примера представлен участок схемы 4-х проводной электрической сети с тремя опорами. Именно переключениями на опорах (в точках отпуска электроэнергии) осуществляется симметрирование нагрузок оперативным персоналом.



Рис. 4. Симметрирование нагрузки.

На схеме цифрами обозначены значения токов нагрузок и суммарные токи фаз А,В,С ЛЭП. Наиболее нагруженной является фаза В. Для симметрирования необходимо часть нагрузки фазы В переключить на менее нагруженную фазу, например А. Так как симметрирование целесообразно начинать с конца ЛЭП, то в рассматриваемом примере предлагается сравнить два варианта переключения, показанные на схеме пунктирными стрелками 1 и 2. В первом случае на фазу А переключается токовая нагрузка 27,5 А, а во втором - 31,4 А. Разработанное программное обеспечение позволяет произвести эти переключения виртуально, а в полученных новых режимах определить величину потерь мощности.

В результате расчетов получено:

* Потери мощности без симметрирования равны 6,84 Вт;
* При симметрировании на опоре №2 – 4,78 Вт;
* При симметрировании на опоре №3 – 2,72 Вт.

В рассматриваемом случае по критерию минимума потерь мощности симметрирование целесообразно проводить на опоре №2 Результаты расчетов расчетов зависят от места переключений и от переключаемых мощностей. Однако, в любом случае, расчетная оценка значимости переключений существенно снизит трудоемкость симметрирования и его эффективность.

ВЫВОДЫ:

Полученные результаты работы позволяют предложить следующий алгоритм оптимизации симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ:

1. По показателям счетчиков электроэнергии (за неделю) определить средние нагрузки фаз. Указанные показатели автоматически получаются из комплекса «Пирамида».
2. Начиная с конца ЛЭП, перебираются возможные варианты симметрирующих переключений. При выборе вариантов используется опыт оперативного персонала. Возможен полный перебор вариантов для переключений на каждой опоре.
3. Для выбранных вариантов с помощью ПО «Симметрия» рассчитываются потери мощности.
4. Для каждой опоры определяется оптимальный с точки зрения потерь мощности вариант симметрирующих перключений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Герасименко, В.Т. Федин. Передача и распределение

2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

3. В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.М. Максимов. РД 34.09.254 Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений. ВНИИЭ, 1986.-43 с.

4. А. Сердимов, И. Протосветский и др. Симметрирущее устройство для трансформаторов. Средство для стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. Новости электротехники, №31 2003 г.

5. Патент РФ RU №2548656 МПК Н01 J 3/26 симметрирования фазных токов четырехпроводной линии устройство для его осуществления.

6. А.М. Маклецов, И.Ф. Галиев, Р.И. Галиев, Лыу Куок Кыонг. Мониторинг несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ.Энергетик, №5 2019 г. С 17-29