

Параметры и устройства для мониторинга качества электроэнергии. Роль качества токов в современной энергетике

Актуальность контроля качества электроэнергии (КЭ)

Требования к контролю КЭ подразумевают в первую очередь контроль параметров напряжения, в соответствии с ГОСТ 13109-97 [1], включая сбор статистики и выдачу отчетов.

В последние 15 лет происходит изменение характера нагрузки электросетей. Повсеместное внедрение инверторов (компьютеры, бытовая электроника, производственное оборудование), внедрение частотных преобразователей, электронных регуляторов скорости двигателей, регулируемого освещения (диммеров), использование электронных балластов ведет к резкому увеличению высших гармоник тока в электросети. Мощность гармоник, выбрасываемых нагрузкой в электросеть, в ближайшие годы будет только возрастать. В связи с этим, возникает необходимость комплексного контроля КЭ.

Контроль качества токов – причины и необходимость

Коэффициент Искажения Синусоидальности (КИС) и приведённый КИС токов

Для выявления фактической ситуации с формой осциллограмм тока и напряжения используются параметры КИС токов и КИС напряжения – мера отклонения формы напряжения и тока от синусоиды. Для вычисления КИС токов токи высших гармоник соотносят с первой гармоникой текущего тока (стандарт IEEE 519 [2]):

$$THD(I) = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

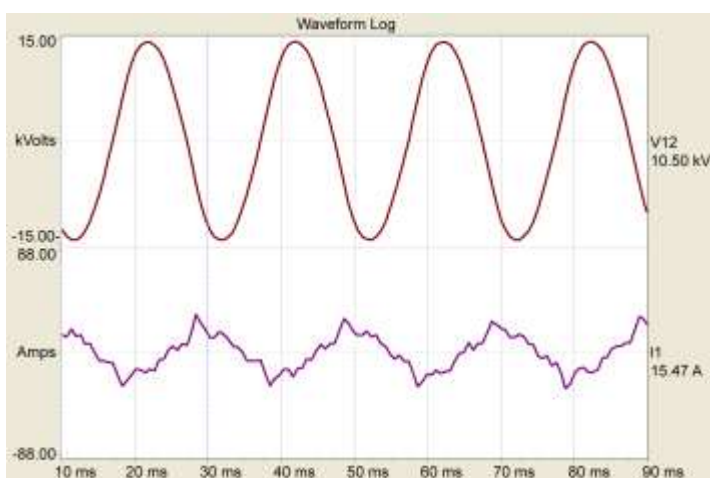


Рис. 1. Графики напряжения и тока в 10 кВ обмотке трансформатора: $V_{12}=10,50$ кВ, $I_1=15,47$ А, КИС напряжения = 2,9 %, КИС тока = 29 %

Аналогично вычисляется КИС напряжения $THD(V)$.

Нелинейные нагрузки рассматриваются на эквивалентной схеме электросети в качестве источника гармоник тока с высоким импедансом. Ввиду низкого импеданса самой электросети наблюдаемое искажение формы напряжения слабее, чем искажение токов, а контроль только параметров напряжения недостаточен для определения условий работы оборудования.

С целью диагностики влияния гармонических токов на

трансформаторы и кабели в точке электросети измеряется приведённый КИС токов – TDD - оценка тока высших гармоник как доли от максимального продолжительно потребляемого тока оборудования (линий) I_L (стандарт IEEE 519):

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_L} \times 100\% .$$

Если за I_L был принят номинальный ток, то $TDD > 6\%$ приведет к ускоренному старению трансформаторов и добавочным потерям энергии, $TDD > 10\%$ может вызвать критический перегрев или возгорание аппаратуры и кабелей.

Как показывают определения, высокое значение КИС тока $THD(I)$ при малой нагрузке не дает представления о загруженности аппаратуры гармониками, в отличие от *приведённого* КИС тока (TDD). Опираясь на КИС тока $THD(I)$, можно оценить только степень искажения формы графика, его отличие от синусоиды.

K-factor для учета роста потерь в силовых трансформаторах

Потери в обмотках от вихревых токов будут расти пропорционально квадрату частоты. Присутствие тока 5-й гармоники, который равен 21% тока первой гармоники, удвоит потери на вихревые токи. Ток 11-й гармоники, равный 9 % тока первой гармоники, произведет тот же эффект. В спектре тока офисной нагрузки 3 и 5 гармоники составляют 50%-70% уровня первой гармоники, 7,9 гармоники – 15-18%, 11, 13 гармоники – 4-6%.

Для расчета дополнительных тепловых потерь в обмотках используется коэффициент роста потерь от вихревых токов - K-factor. Коэффициент роста электрических потерь в обмотках из-за присутствия гармоник тока, по отношению потерям, которые были бы при том же эффективном значении тока, но синусоидальной формы, определяется выражением:

$$K - factor = \frac{\sum_n I_n^2 n^2}{\sum_n I_n^2} .$$

K-factor показывает рост потерь от вихревых токов в проводах обмотки. При нагрузке трансформатора на 70...100% номинальной мощности и даже *при K-factor=1* (синусоидальный ток) на вихревые токи приходится 4...8 % общих потерь в обмотках. Верхний предел относится к сухим трансформаторам. Присутствие в обмотках нагруженного трансформатора интенсивных гармоник тока ($K-factor > 1$) в отдельных случаях приводит к увеличению потерь от вихревых токов до величины активных потерь.

Циркуляция 3-ей (6-й, 9-й ...) гармоник тока в замкнутом контуре обмоток, соединённых в треугольник, вызовет дополнительные тепловые потери. Часто в треугольник соединены обмотки напряжения 10-35кВ в трансформаторах Δ/Y , их изоляция работает под существенным напряжением. Известны случаи пробоя Δ -обмотки из-за непредусмотренного нагрева вихревыми токами и токами 3-ей, 6-й, 9-й, 12-й ... гармоник и термического износа изоляции. Контроль $K-factor$ тока и

величины тока нейтрали на обмотке низкого напряжения трансформатора являются необходимыми мерами на трансформаторах Δ/Y с нелинейной нагрузкой.

Перегрев выше конструктивно допустимых пределов из-за гармоник нетипичен при нагрузке трансформатора ниже 70%, но имеются постоянно увеличенные потери энергии. Потери суммируются на разных уровнях напряжения, влияя на эффективность энергосистемы.

Разные гармоники по-разному проходят трансформатор. При наличии только обмоток по схеме "ЗВЕЗДА" трансформации подвергнутся все гармоники. В трансформаторах Δ/Y , как сказано выше, из-за замыкания части гармоник контуре Δ -обмотки только гармоники, номер которых не кратен 3, подвергаются трансформации наряду с током основной частоты.

На рис. 2 приведены результаты мониторинга на обмотках реального трансформатора 22/0,4 кВ на входе большого пивоваренного завода.

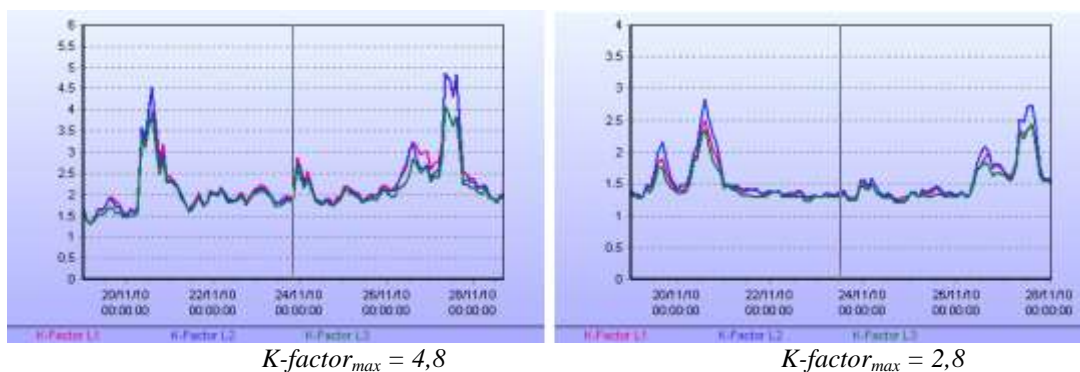


Рис. 2. K -factor токов трех фазных обмоток трансформатора: слева - три фазы обмотки НН 0,4 кВ; справа – три фазы обмотки ВН 22 кВ

Контроль режима потерь трансформатора по гармоникам тока даёт только измерительная аппаратура с разработанным комплексом анализируемых параметров по таким стандартам, как IEEE 519 [2] и G5/4 [3], в дополнение к стандартным функциям учета КЭ.

Потери энергии в сегменте электросети при высоком K -factor вырастают на 20...60%. При загрузке трансформатора >70...75% работа обмоток под гармонической нагрузкой приводит к уменьшению срока жизни трансформатора.

Необходимость непрерывного мониторинга гармоник напряжений и токов

Уровень гармоник должен постоянно находиться в допустимых пределах согласно требованиям оборудования и стандартов. Нарушение допустимого уровня приводит к сбоям и отказам оборудования: сгорание электродвигателей и силовых конденсаторов для компенсации реактивной мощности; непредусмотренная вибрация и истирание подшипников электродвигателей, перегрев и сгорание провода нейтрали у потребителей, внешне беспричинные сбои в работе цифровой офисной техники, ложные срабатывания защит.

Современные интеллектуальные анализаторы качества энергии регулярно сохраняют в отчетах данные о текущих параметрах КЭ. Для подробного анализа различных гармонических выбросов производится автоматическое осциллографирование в самом приборе напряжений и токов в моменты

значительного отклонения от норм их гармонического состава, а также при отклонениях других параметров качества электроэнергии.

Следует помнить, что анализ КЭ по ГОСТ 13109-97 основан только на контроле параметров напряжения. Наряду с контролем КЭ по ГОСТ 13109-97 необходимо предусматривать отчеты с информацией о качестве токов (TDD, K-factor, THD(I), индивидуальные гармоники тока), поскольку эти величины несут существенную информацию о тепловом режиме трансформаторов и кабелей.

Пример использования мониторинга токов.

Контроль гармоник токов на трансформаторе, работающем в сети с высоким уровнем гармоник тока

Трехфазный сухой трансформатор 22/0,4 кВ, имеющий номинальную мощность без охлаждения 2500 кВА или 3500 кВА с форсированным охлаждением, эксплуатировался без форсированного охлаждения. В результате перегрева и пробоя изоляции обмотки высокого напряжения (ВН) трансформатор был необратимо поврежден (рис. 3). Вместо него установлен сухой трансформатор того же типа с форсированным охлаждением. Новый трансформатор нагружен на 84% от полной разрешенной мощности 3500 кВА. Несмотря на неполную загрузку, тепловые потери трансформатора в установившемся режиме составили 42 кВт, температура внешней поверхности фазных обмоток 22 кВ в отдельных зонах >145 °С, хотя температура



Рис. 3. Последствия пробоя изоляции обмоток 22 кВ.

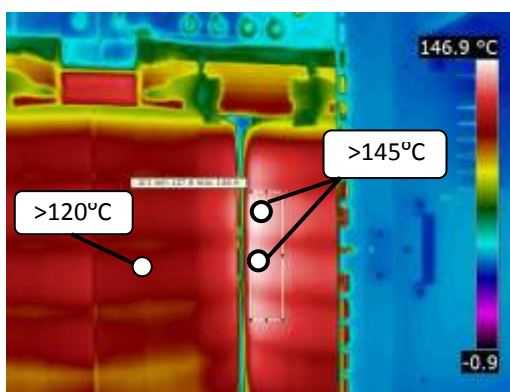


Рис. 4. Температурная карта поверхности обмоток ВН трансформатора с принудительным охлаждением: температура в "белой" зоне, в зазоре между обмотками соседних фаз превышает 145°C

воздуха в помещении, где установлен трансформатор, не превышает 40 °С. Температура внутри обмоток выше значений, измеренных на поверхности. Тепловизионный снимок обмоток работающего трансформатора приведен на рис. 4.

На обмотке низкого напряжения (НН) зафиксирован высокий уровень гармоник тока (TDD=11%, THD(I)=16%). Это является причиной дополнительных тепловых потерь в обмотках НН и ВН. Существует риск повреждения нового трансформатора даже при форсированном охлаждении, при нагрузке > 70% и TDD >10%.

По результатам обследования на предприятии принято решение о переводе части нагрузок на другой трансформатор.

Примеры современных интеллектуальных приборов для комплексного контроля КЭ и параметров тока

Примером устройств, выполняющих функции универсальных счетчиков энергии, регистрацию параметров КЭ и полного набора гармонических характеристик напряжений и токов, являются регистраторы ПКЭ компании SATEC: PM175, EM720, PM180 и SA330 класса точности 0,2S. Эти устройства наряду с измерением энергии и мониторингом всех электрических параметров выполняют функции программируемого многоканального автоматического осциллографа, регистрацию событий, сбор статистики, автоматическое составление отчетов по ГОСТ 13109-97.

Устройство премиум-класса EM720 сохраняет полную работоспособность до 6 часов при продолжительных отключениях питания; реализована скоростная запись коротких транзиентных импульсов напряжения относительно "земли", возникающих вследствие грозových разрядов и коммутации в сети.

Устройства SATEC PM180 и SA330 применяются для анализа показателей КЭ там, где необходимы расширенные возможности коммуникации и контроля внешних устройств, модульность, большой объем энергонезависимой памяти. Устройство SA330 измеряет и записывает неискаженные осциллограммы токов КЗ до 30 крат от номинального тока и позволяет определять расстояния до места короткого замыкания (КЗ).

Все вышеперечисленные приборы SATEC, кроме функций, обязательных сегодня по ГОСТ для анализатора КЭ, обеспечивают измерение полного набора гармонических параметров тока - TDD, THD(I) согласно определению IEEE 519; K-factor; индивидуальные гармоники и спектр гармоник тока, а также поддерживают коммуникационный протокол МЭК 61850 [4].

Выводы

Для мониторинга, контроля и анализа качества электрической энергии и его влияния на сети, трансформаторы и нагрузку, прибор контроля и ПО должны обеспечить:

1. Анализ, регистрацию событий и автоматическое составление отчетов по качеству электроэнергии согласно ГОСТ 13109-97;
2. Осциллографирование форм токов и напряжений, включая пре- и пост-триггеринг, при превышениях значительных пороговых уровней, заданных в соответствии со стандартом (и/или уровней, допустимых по условиям эксплуатации оборудования);
3. Наряду с контролем качества напряжения по ГОСТ 13109, обеспечить контроль качества токов: регистрацию приведённого КИС тока (*TDD*); КИС тока (*THD(I)*), К-фактора и индивидуальных гармонических токов в самом приборе;
4. Сопоставление значений токов гармоник в Амперах RMS с пороговыми значениями, заданными по стандарту ER- G5/4 (см. [3]).

Список литературы:

- [1] ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- [2] IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.
- [3] ER G5/4-1 Planning Levels for harmonic Voltage Distortion and the Connection of Non-Linear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in the United Kingdom <http://www.ena-eng.org/ena-docs/>.
- [4] МЭК 61850 Коммуникационные сети и системы подстанций.