

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Н. И. Степанкин

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель О. Г. Широков

Исследование влияния высших гармонических составляющих тока и напряжения на основные элементы систем электроснабжения является актуальной задачей [1], [3], [8] [15]–[17]. В результате анализа этих работ можно сделать следующий вывод: основными формами воздействия высших гармоник на элементы системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений гармоник вследствие резонанса;
- снижение эффективности процессов генерации передачи и использование электроэнергии вследствие дополнительных потерь;
- ускоренное старение изоляции электрооборудования;
- ложная работа устройств релейной защиты и автоматики;
- помехи в сетях телемеханики;
- дополнительная погрешность при учете электрической энергии и так далее.

Ввиду чрезвычайной важности снижения потерь электроэнергии актуальной является задача оценки дополнительных потерь мощности в основных элементах системы электроснабжения от высших гармоник. Зная величину этих потерь, можно определиться со способом их снижения: будь то организационные мероприятия либо, если их недостаточно, применение специальных технических средств, снижающих уровень гармоник.

Рассмотрим методы оценки дополнительных потерь в элементах ЭЭС от высших гармоник тока и напряжения в различных элементах системы электроснабжения.

Линия электропередачи (ЛЭП), так же как и силовые трансформаторы, является составным элементом электрических сетей. Дополнительные потери активной мощности в ЛЭП вызваны протеканием токов высших гармоник:

$$P_{\Sigma v} = 3 \sum_v I_v^2 R_i k_{rv}, \quad (1)$$

где ν – номер гармоники; n – число учитывающих гармоник; I_ν – ток ν -й гармоники; R_i – активное сопротивление линии на основной частоте; $k_{r\nu}$ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта, как правило, его принимают равным $k_{r\nu} = 0,47\sqrt{\nu}$.

Ряд авторов в своих работах уделили значительное внимание уточнению параметров линий электропередачи в расчетных схемах замещения на частотах высших гармоник. Следует отметить работу [10], где опытным путем исследуется влияние высших гармоник на активное и реактивное сопротивление проводов марок АС и АСО, а также кабелей 6–12 кВ различного сечения. В соответствии с этим исследованием удельное активное сопротивление проводника на частоте ν -й гармоники равно:

$$r_{0\nu} = r_0(k_{\Pi\nu} + k_{0\nu}), \quad (2)$$

где r_0 – удельное сопротивление проводника постоянному току (с учетом температуры); $k_{\Pi\nu}$ – коэффициент, учитывающий явление поверхностного эффекта ν -й гармоники и равный: $k_{\Pi\nu} = 0,021\sqrt{f}$ – для меди и $k_{\Pi\nu} = 0,01635\sqrt{f}$ – для алюминия [10]. Коэффициент $k_{0\nu}$ учитывает эффект близости для ν -й гармоники и определяется:

$$r_{0\nu} = \frac{(1,18 + k_{\Pi\nu})}{(k_{\Pi\nu} + 0,27)} \left(\frac{d^2}{a^2} \right), \quad (3)$$

где d – диаметр жилы проводника, мм; a – расстояние между центрами жил, мм.

Что касается эффекта близости, то его обязательно нужно учитывать для кабельных линий. Для воздушных линий, если $a > 50$ мм, эффект близости предлагается не учитывать [10] и выражение для расчета потерь от высших гармоник в ЛЭП примет вид:

$$P_{\Sigma\nu} = 3 \sum I_\nu^2 r_0 (k_{\Pi\nu} + k_{0\nu}). \quad (4)$$

Дополнительные потери в электрических машинах разделяются на основные и дополнительные [5]. Основные потери обусловлены основными электромагнитными и механическими процессами, происходящими в машине. К этим потерям относятся потери в меди обмоток и в активной стали от основного потока мощности, а также механические потери.

Метод определения дополнительных потерь от высших гармоник $\Delta P_{r\nu}$ по кривым, на которых представлены отношения потерь $\Delta P_{\text{дв}}$ при напряжении, равном 1 % напряжения основной частоты к суммарным минимальным потерям $\Delta P_{\text{ном}}$, достаточно прост в использовании [6]. Потери на частотах гармоник выше 13-й весьма малы, и ими можно пренебречь. Это справедливо для тех систем, в которых амплитуда напряжения высших гармоник уменьшается при увеличении порядка высших гармоник. Однако при наличии в системе мощных источников тока высших гармоник или резонансных условий на гармониках более высокого порядка (вплоть до 40-й) могут наблюдаться очень большие значения гармоник напряжения с порядком выше 13-го [7].

Метод, предложенный в [10], позволяет оценить дополнительные потери в синхронных двигателях от высших гармоник ΔP_{rv} :

$$P_v = \sum_{v=2}^n \Delta P_M(v) + \sum_{v=2}^n \Delta P_{ст}(v) + \sum_{v=2}^n \Delta P_n(v), \quad (5)$$

где $\sum_{v=2}^n \Delta P_M(v)$ – дополнительные потери в меди; $\sum_{v=2}^n \Delta P_{ст}(v)$ – дополнительные потери в стали; $\sum_{v=2}^n \Delta P_n(v)$ – мощность, идущая на преодоление тормозного момента.

Дополнительные потери в меди определяются как [10]:

$$\sum_{v=2}^n P_M(v) = I_v^2 \Delta P_x \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right) \frac{\sqrt{v} + k' \sqrt{v \pm 1}}{v^2}, \quad (6)$$

где I_n – кратность пускового тока при номинально напряжении основной частоты; ΔP_k – потери короткого замыкания; U_v – действующее значение v -й гармоники; $k' = \frac{R_{2\sigma}}{R_1}$ – соотношение эквивалентного сопротивления ротора к сопротивлению статора. Знак «+» в подкоренном выражении соответствует симметричным составляющим гармоник, вращающихся против вращения поля основной гармоники, знак «-» – симметричным составляющим гармоник, создающих поля, вращение которых совпадает с вращением поля основной гармоники.

Дополнительные потери в стали определяются [10]:

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{ст}(v) = \Delta P_{ст.ном} \sum \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{1}{v^{0.7}}, \quad (7)$$

где $\Delta P_{ст.ном}$ – номинальные потери в стали двигателя при номинальном напряжении U_v .

Мощность для определения тормозного момента [10]:

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_M(v) = \Delta P_{ном} \sum \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{1}{v^2 \sqrt{v \pm 1}} \left(\frac{M_{II}}{M_{ном}} \right), \quad (8)$$

где M_{II} и $M_{ном}$ – пусковой и номинальный моменты синхронного двигателя.

Дополнительные потери асинхронных двигателей, обусловленные несинусоидальностью, определяются из выражения [11], [12]:

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{\sum v} = \Delta P_{M1.ном} I_v^2 \sum \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2}, \quad (9)$$

где $\Delta P_{M1.ном}$ – потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; знак «+» под знаком корня соответствует симметричным составляющим гармоник, создающим поля вращения, встречные полю основной гармоники, а знак «-» – попутные.

Применение этой формулы для расчета результирующих дополнительных потерь активной мощности в системах электроснабжения с большим количеством АД затруднено [12]. В связи с этим целесообразно получить более простое выражение для таких расчетов. Коэффициент, учитывающий параметры асинхронного двигателя, обозначим $k_{\text{АД}}$:

$$k_{\text{АД}} = \frac{\Delta P_{\text{м1.ном}} I_v^2}{P_{\text{ном}}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная активная мощность двигателя.

При этом

$$\Delta P_{\text{м1.ном}} = m_t I_t^2 R_t, \quad (11)$$

где m_t – число фаз; R_t – активное сопротивление статорной обмотки, на основной частоте Ом.

$$I_t = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi \cdot \eta}, \quad (12)$$

где $\cos \varphi$ – номинальный коэффициент мощности; η – КПД двигателя.

Тогда, с учетом (11) и (12), выражение (10) примет вид:

$$k_{\text{АД}} = \frac{r_t I_t}{\cos \varphi}, \quad (13)$$

где r_t – активное сопротивление статорной обмотки, на основной частоте, о. е.

В результате получаем выражение для расчета дополнительных потерь от высших гармоник в асинхронных двигателях:

$$P_{\sum v} = k_{\text{АД}} P_{\text{ном}} \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2}. \quad (14)$$

Литература

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах : пер. с англ. / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970 – 432 с.
3. Гидалевич, Е. Д. Упрощенный расчет мощности потерь в косинусных конденсаторах при несинусоидальном напряжении / Е. Д. Гидалевич // Пром. энергетика. – 1990. – № 7. – С. 24–30.
4. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О. Григорьев [и др.] // Новости электротехники. – 2002. – № 6 (18). – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2003/18_19/14.php.
5. Данилевич, Я. Б. Добавочные потери в электрических машинах / Я. Б. Данилевич, Э. Г. Кашарский. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 164 с.
6. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат. – 2000. – 192 с.

7. Исследование электрической сети Братского алюминиевого завода, анализ гармонических составляющих, выработка технического задания по улучшению качества электроэнергии : отчет о НИР по г/б теме № 2205010, УДК 621.311.004.12 (047.2) ; гос. рег. № 01200116049 / рук. И. И. Карташаев, 2000.
8. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский [и др.]. – М. : Энергия, 1975. – 248 с.
9. Маньяин, Э. А. Потери на вихревые токи в обмотках трансформаторов при несинусоидальном токе / Э. А. Маньяин // Электричество. – 1955. – № 12. – С. 48–52.
10. Семичевский, П. И. Методика расчета дополнительных потерь активной мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные высшими гармониками : автореф. ... дис. канд. техн. наук / П. И. Семичевский. – М., 1978. – 206 с.
11. Церазов, А. Л. Исследование влияний несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей / А. Л. Церазов, Н. И. Якименко. – М. : Госэнергоиздат, 1963 – 120 с.
12. Шидловский, А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев : Наук. думка. 1985. – 268 с.
13. IEEE Std 519 – 1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, 1992.