

Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий

Шпиганович Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
Довженко Сергей Викторович,
аспирант.

Липецкий государственный технический университет.

Электрохимический пробой изоляции происходит по причине протекания химических реакций в изоляционном слое, скорость которых увеличивается при подведении дополнительной тепловой энергии. Отказ, вызванный изменением ресурса изоляции, относят к постепенным [1]. Существующие методики расчета [2] [3] [4] не учитывают особенности геометрии проводников и изоляции, что приводит к значительным погрешностям при определении параметров безотказности.

В токоведущих элементах линий электропередачи из-за наличия активного сопротивления происходят потери энергии, которая рассеивается в виде тепла [5]. Предлагается дополнительно учитывать увеличение сопротивления каждой фазы кабельной линии электропередачи с учетом скин-эффекта.

$$\Delta_{sev} = c \sqrt{\frac{2\varepsilon_0}{2\pi f v}} r_0; \quad (1)$$

$$s_{kv} = \pi \left[r^2 - \Delta_{se}^2 0,5 \left(\frac{r - \Delta_{se}}{|r - \Delta_{se}|} + 1 \right) \right]; \quad (2)$$

$$K_v = \frac{r_0 l s}{s_k r_0 l} = \frac{s}{s_{kv}}, \quad (3)$$

[6]

где Δ_{sev} - толщина токопроводящего слоя, мм; c - скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$, м/с; f - частота сети, Гц; r_0 - удельное сопротивление проводникового материала; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Кл²/(Нм²); v - номер гармоники; s - площадь поперечного сечения проводника; K_v - коэффициент увеличения сопротивления на v -той гармонике.

С учетом (1)-(3) определяется значение тепловой мощности, выделяющейся в материале проводника и изоляционном материале соответственно

$$Q = R_{np} (I_1^2 K_1) + R_{np} \sum_{v=2}^{v_{max}} I_v^2 K_v; \quad (4)$$

$$Q_{ins} = U^2 2\pi f C t g \delta_1 + \sum_{v=2}^{v_{max}} U_v^2 2\pi f v C t g \delta_v, \quad (5)$$

где R_{np} - сопротивление проводникового материала, Ом; $t g \delta_v$ - тангенс угла диэлектрических потерь на частоте гармоники с номером v ; C - электрическая емкость образца.

Для определения мощности тепловыделения в изоляционных материалах кабельной линии необходимо знать значения частичных емкостей (рис. 1). Учитывая, что силовой кабель является симметричной системой, численные значения определяются по выражению [7]

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{12} = \tilde{N}_{23} = \tilde{N}_{31}; \\ C_{10} = \tilde{N}_{20} = \tilde{N}_{30}; \\ C_{12} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{r_1 + \Delta_1 + \sqrt{2r_1\Delta_1 + \Delta_1^2}}{r_1 + \Delta_1 - \sqrt{2r_1\Delta_1 - \Delta_1^2}}}; \\ C_{10} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{r_2^2 + r_1^2 - a^2 + \sqrt{(r_2^2 - r_1^2 + a^2) - 4a^2r_2^2}}{r_1r_2}}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где C_{10} – частичная емкость между фазным проводником и металлическим экраном; C_{12} – частичная емкость между фазными проводниками; r_1 – радиус токопроводящей жилы; Δ_1 – толщина фазной изоляции; r_2 – радиус защитных покровов; a – расстояние между центрами окружностей и токопроводящей жилой.

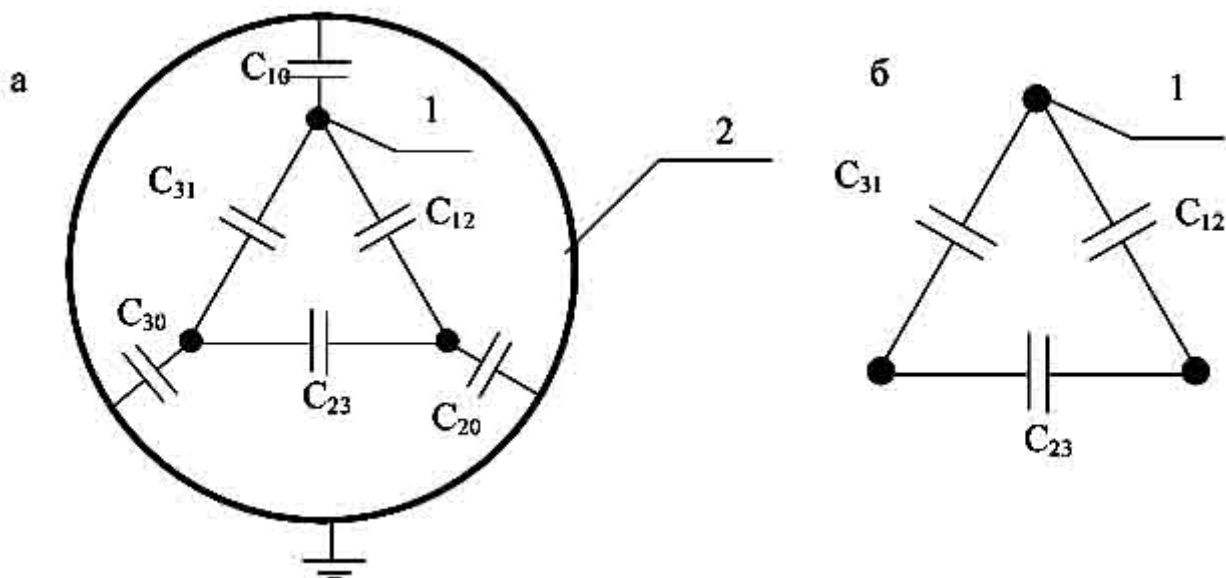


Рис. 1.

Поперечная схема замещения кабельной линии: а – напряжением выше 1 кВ; б – напряжением до 1 кВ. 1 – фаза кабеля; 2 – заземленная металлическая оболочка.

Выделяемая тепловая энергия может быть поглощена окружающим атмосферным воздухом и элементами конструкций. Существует три способа передачи тепловой энергии: излучение, конвекция, теплопроводность.

Для создания расчетной модели предлагается использовать программный комплекс EICut 5.4. Процесс моделирования состоит из трех основных этапов: создание геометрической модели системы, определение путей передачи тепловой энергии, запись коэффициентов теплопередачи. Модель для трехжильного кабеля с поливинилхлоридной изоляцией представлена на рис. 2.

Для определения характеристик теплопередачи предполагается, что отдача тепловой энергии с поверхности фазным проводом происходит путем теплопроводности, а с поверхности внешней оболочки – всеми тремя возможными способами теплопередачи.

На основании изложенного выше, произведен расчет распределения температуры в изоляционной конструкции кабеля АВВГ 3х50, питающего группу частотных преобразователей. Величина тока, протекающего в нормальном режиме работы оборудования, по результатам измерений составляет 224, А.

Исходными данными являются радиусы фазных проводов, геометрические размеры изоляции, коэффициент теплопроводности материалов $K_{\text{теп}}$, Вт/(м К), удельная теплоемкость материалов, кДж/

[8]
(кг К)

Тепловая мощность источника энергии характеризуется объемной плотностью мощности тепловыделения. Ее значение определяется по следующим выражениям:

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\pi(r_1 \cdot 10^{-3})^2 l}; \tag{7}$$

$$q_{ins} = \frac{Q_{ins}}{V_{ins}} = \frac{Q}{\pi l(((r_1 \cdot 10^{-3}) + \Delta_1)^2 - (r_1 \cdot 10^{-3})^2)}, \tag{8}$$

где q и q_{ins} – объемные плотности мощности тепловыделения в фазном проводе и изоляции; l – длина кабеля.

Подставляя в (7 и (8) установленные числовые значения, получим следующие результаты, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Объемные плотности тепловыделения.

| Плотность тепловыделения | Значение, Вт/м ³ |
|---|-----------------------------|
| Плотность тепловыделения в проводнике: без учета высших гармоник с учетом высших гармоник | 73609,161 91315,149 |
| Плотность тепловыделения в изоляции: без учета высших гармоник с учетом высших гармоник | 19,649 19,844 |

Диаграмма распределения температур в поперечном сечении кабельной линии представлена на рис. 2

Расчет проводился для контура А-В (рис.2) при температуре окружающей среды 298, К. Максимальная разность температур во внутреннем слое изоляции в случае наличия в сети высших гармоник тока и напряжения достигает 11,4, К. Максимальная величина дополнительного нагрева кабеля составляет 2,7, К. На основании предложенной методики рассчитаны численные значения приращения температуры внутренней изоляции кабелей различного сечения при наличии в сети высших гармоник. Результаты расчетов сведены в табл. 2

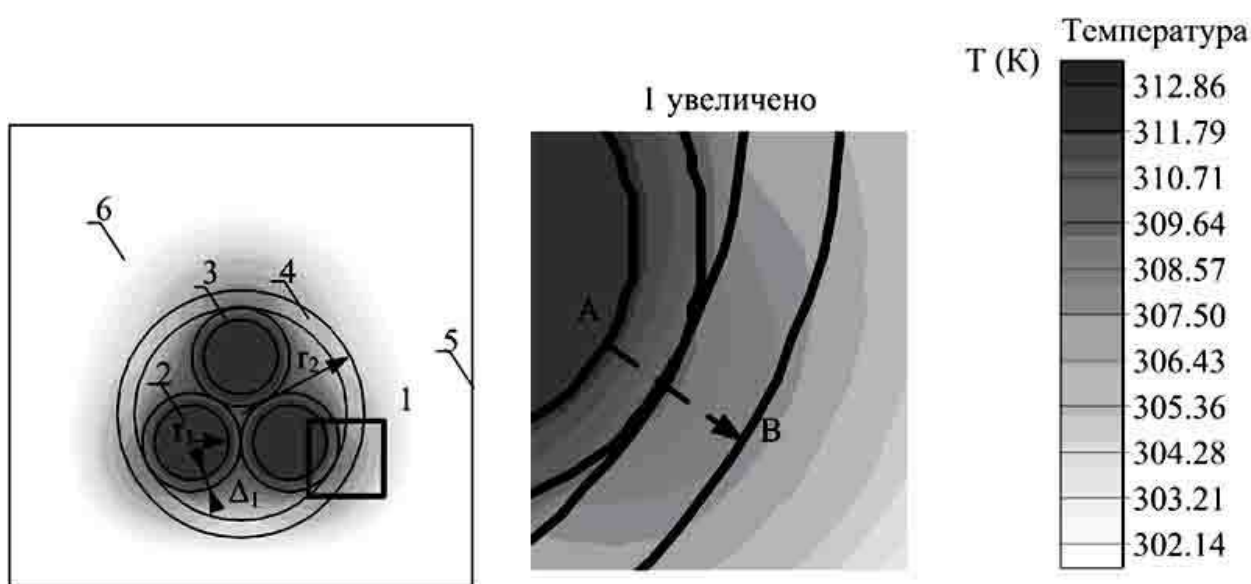


Рис. 2.

Геометрическая модель кабеля АBBV и диаграмма распределения температур: 1 – фрагмент модели; 2 – фазный провод; 3 – внутренняя изоляция; 4 – оболочка; 5 – окружающие кабель объекты; 6 – атмосферный воздух.

Таблица 2.

Значения приращения температуры кабелей.

| Марка кабеля | Приращение температуры $\Delta\tau$, °C |
|-------------------------|--|
| ВВГ 3 x 4 | 3,2..3,4 |
| ВВГ 3 x 25 | 3,0.. 3,1 |
| ВВГ 3 x 35 | 2,9..3,1 |
| <u>[9]</u> ВВГ 4 x 6 | 2,2..2,3 |
| ВВГ 4 x 50 ⁹ | 1,9... 2,2 |

[10]

Срок службы определяется уравнением Аррениуса .

$$V_{cr} = V_0 \exp(-W_a / RT); \tag{9}$$

$$\tau_{сл} = K / V_{cr}, \tag{10}$$

где V_{cr} – скорость протекания химических реакций в диэлектрике; $\tau_{сл}$ – срок службы изоляции; K – поправочный коэффициент, зависящий от типа материала диэлектрика; R – универсальная газовая постоянная; T – температура изоляции.

Отношение сроков службы изоляции при различных температурах равно⁷

$$\frac{\tau_{сл1}}{\tau_{сл2}} = \exp(-\alpha(T_1 - T_2)) = 2^{-(T_1 - T_2) / \Delta T} \tag{11}$$

где ΔT – величина приращения температуры, вызывающей сокращение срока службы изоляции в 2 раза.

Значение этого коэффициента можно приближенно определить по таблице 3 в зависимости от

[11]

класса изоляции

Таблица 3.
Значение коэффициента ΔT .

| Класс изоляции | ΔT , К |
|----------------|----------------|
| А | 8 |
| В | 8-10 |
| Н | 12 |

Для сохранения срока службы при наличии высших гармоник в сети необходимо снижение тока в проводнике. Если предположить, что с уменьшением тока частотный спектр остается неизменным, то с учетом (6) получим следующее соотношение токов:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{(K_1)}{(K_1 + \sum_{v=2}^{v_{max}} K_v K_{Av})} \tag{12}$$

Если пренебречь поверхностным эффектом, то (16) примет вид

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{1 + \sum_{v=2}^{v_{max}} K_{Av}} \tag{13}$$

Предложенная методика позволяет определить уровень безотказности электрооборудования в зависимости от характеристик спектра высших гармоник в системе электроснабжения и учитывать

изменение ресурса при проектировании электрических сетей. Возможно проведение оценки ресурса не только кабельных линий электропередачи, но и любого силового электрооборудования, имеющего электроизоляционные элементы. Приведенная модель в значительной степени повышает точность определения надежности изоляционных конструкций.

Литература.

1. Баскин, Э.М. Оценка остаточного ресурса полиэтиленовых (XLPE) изолирующих кабелей, находящихся в эксплуатации/ Э.М. Баскин// Электротехника. – 2004. – №2. – С.33-35.
2. Гиберт, Д. П. Надежность электрической изоляции/ Д. П. Гиберт – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 61 с.
3. Киреева, Э.А. Справочник электрика/ Э.А. Киреева, Л.В. Гусев, А.Г. Харитон. – М.: Колос, 2008. – 464 с. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин/ Н.Л. Кузнецов. – М: Изд-во МЭИ, 2006. – 432 с.
4. Пашков, В.Н. Обеспечение эффективности функционирования систем электроснабжения листопрокатных производств с негативными возмущающими факторами: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 2004.
5. Середкин, О.А. Обеспечение эффективности функционирования электрических систем листопрокатного производства: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 1999.
6. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1974. – 944 с.
7. Шпиганович, А.Н. Внутриводное электроснабжение и режимы / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 742 с.
8. Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика/ В. Штиллер. – М.: Мир, 2000. – 176 с.
9. Электротехнический справочник: Том 1/ под ред. П.Г. Грудинского, М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 880 с.
10. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость.

Поступила в редакцию 21.07.2008 г.

-
- [1] Пашков, В.Н. Обеспечение эффективности функционирования систем электроснабжения листопрокатных производств с негативными возмущающими факторами: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 2004.
- [2] Гиберт, Д. П. Надежность электрической изоляции/ Д. П. Гиберт – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 61 с.
- [3] Баскин, Э.М. Оценка остаточного ресурса полиэтиленовых (XLPE) изолирующих кабелей, находящихся в эксплуатации/ Э.М. Баскин// Электротехника. – 2004. – №2. – С.33-35.
- [4] Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин/ Н.Л. Кузнецов. – М: Изд-во МЭИ, 2006. – 432 с.
- [5] Шпиганович, А.Н. Внутриводное электроснабжение и режимы / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 742 с.
- [6] Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов/ Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1974. – 944 с.
- [7] Середкин, О.А. Обеспечение эффективности функционирования электрических систем листопрокатного производства: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 1999.
- [8] Киреева, Э.А. Справочник электрика/ Э.А. Киреева, Л.В. Гусев, А.Г. Харитон. – М.: Колос, 2008. – 464 с.
- [9] Для четырехжильных кабелей приращение температуры определялось при отсутствии уравнительных токов в нулевом проводнике.
- [10] Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика/ В. Штиллер. – М.: Мир, 2000. – 176 с.
- [11] ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость.