

УДК 621.315.62.027.3.004.1.

Н. В. Собчук, к. т. н., доц.; Е. В. Слободянюк, к. п. н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

Проанализированы электрофизические процессы повреждения изоляции электрических машин для определения оптимальной величины испытательного напряжения и эффективного контроля за состоянием изоляции. Предложены высоковольтные испытания выпрямленным напряжением, при котором диэлектрические потери минимальны и местный нагрев при испытании изоляции будет отсутствовать.

Ключевые слова: изоляция электрических машин, электрофизические процессы в изоляции, контроль за состоянием, минимальные диэлектрические потери.

На электрических станциях систематически проводят учет и анализ повреждений изоляции эксплуатационным персоналом высокой квалификации. Электрофизические процессы повреждения изоляции приводят к чисто электрическому механизму пробоя, электротеплового механизма, ионизации механизма и их комбинации.

Как показывает опыт испытаний, величины пробивных напряжений имеют статистический разброс, а интегральную функцию вероятности пробоя $P_{np}(U)$ хорошо описывает нормальный закон распределения [1]:

$$P_{np}(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2}} dU, \quad (1)$$

где σ – стандарт распределения; \bar{U} – среднее значение пробивных напряжений.

Практически возможное отклонение пробивного напряжения от \bar{U} не превышает $\pm 3\sigma$. Вероятность такой величины отклонения оценивают в 0,0013, а вероятность отклонения $\pm 3\sigma$ оценивают в 0,023. Вот почему для характеристики пробивного напряжения заданной формы (апериодический импульс, синусоида, постоянное напряжение) достаточно знать \bar{U} и σ .

В случае применения правила 3σ для изоляционной конструкции следует учитывать возможность снижения пробивного напряжения до $\bar{U}-3\sigma$.

При постоянном высоком напряжении ионизационные и электротепловые явления выражены слабо, однако возникает новый вид старения изоляции – химическое старение, то есть электромагнитные явления, которые постепенно приводят к химическому перерождению диэлектрического материала, росту токов проводимости и окончательно к электрическому или тепловому пробоям.

Электролиз возникает в диэлектриках с повышенной ионной проводимостью, например, в бумажно-масляной изоляции.

Исследование действия перенапряжений грозового и внутреннего происхождения на главную изоляцию электрических машин и аппаратов показали [2], что пробивное напряжение изоляции без дефектов в 2÷2,5 раза выше остаточного напряжения ограничителей перенапряжений, поэтому эти перенапряжения безопасны.

В эксплуатации изоляция стареет вследствие ряда медленных процессов, таких как общее изменение структуры изоляции под воздействием сильных электрических полей, температур, которые выше класса нагревостойкости диэлектриков.

Особенно негативно воздействие концентраторов: напряженности электрического поля, механических нагрузок, тепловых потерь. Эти концентраторы создают появления местных дефектов изоляции, которые медленно увеличиваются.

В изоляции новых электрических машин и аппаратов есть конструктивные недоработки

(ложные конструкции), технологические недоработки (несовершенные технологии) и недостаточная эффективность заводских испытаний.

Начнем с оценки эффективности высоковольтных испытаний главной изоляции новых электродвигателей.

Величина испытательного напряжения промышленной частоты для двигателей с номинальным напряжением $U_{ном} = 600$ В составляет:

$$U_{випр.f=50Г0} = 2U_{ном} + 1000 = 2,2 \text{ кВ.}$$

Как показано в [3] испытательное напряжение 2,2 кВ позволяет выявить только 45% сквозных отверстий, а испытательное напряжение 1,5 кВ соответственно 40%.

Эти показатели эффективности обнаружения сквозных дефектов испытательным напряжением промышленной частоты касаются неувлажненной изоляции. Для изоляции в состоянии эксплуатационного увлажнения и загрязнения эффективность профилактических испытаний будет выше. В целом величина испытательного напряжения промышленной частоты для таких двигателей малоэффективна, так как не проявляет существенного количества даже грубых дефектов.

Анализ результатов испытаний изоляции мегомметром на 1000 В показывает, что только в 2÷3% испытаний сопротивление изоляции со сквозными дефектами существенно снижается, а соответственно, в 98÷97% сопротивление остается неизменным.

Большинство дефектов в сухой изоляции также не обнаруживаются мегомметром 1000 В. Исключение составляют проколы изоляции, на стенках которых частички сублимированных металлов или углеродные следы.

Многолетний эксплуатационный опыт свидетельствует о том, что при увеличении величины испытательного напряжения количество выявленных дефектов возрастает, а аварийность от повреждений изоляции уменьшается.

Расчет уровней изоляции электрических машин и аппаратов базируется на допустимой напряженности электрического поля, равной 2,0÷2,2 кВ/мм. В реальных условиях главная изоляция ЭМ работает в условиях неравномерного электрического поля. Анализ распределения мест пробоя изоляции из микаленты и лакоткани показывает, что самыми уязвимыми являются ребра секции, где число пробоев составляет около 80% от общего количества пробоев, а остальные 20% примерно поровну распределяются между боковыми, нижней и верхней гранями. Это объясняется наибольшей неравномерностью электрического поля на ребрах. Коэффициент неравномерности в пазовой части обмотки самый большой на ребрах и зависит от отношения радиуса закругления r и толщины изоляции d . Величина радиуса закругления ребер $r = 3÷5$ мм. При отношении $r/d \leq 0,5$ достигается удовлетворительная величина коэффициента неравномерности $K_n (r/d \geq 0,5) < 1,5$. Тогда

$$d > \frac{r}{0,5} = \frac{3÷5}{0,5} = 6÷10 \text{ мм. Исходя из толщины } d \geq 6÷10 \text{ мм и допустимой напряженности } E_{доп} = 2,0÷2,2 \text{ кВ/мм, можно получить величину испытательного напряжения } U_{исп} = \frac{2,0÷2,2}{1,5} \cdot d = \frac{2,0÷2,2}{3} \cdot 2d = (0,67÷0,73) \cdot (12÷20) = 8÷14,6 \text{ кВ.}$$

Другим направлением повышения эффективности испытаний изоляции электродвигателей $U_n = 600$ В являются испытания выпрямленным напряжением. При таком напряжении диэлектрические потери минимальны и опасного местного нагрева при испытании изоляции не будет.

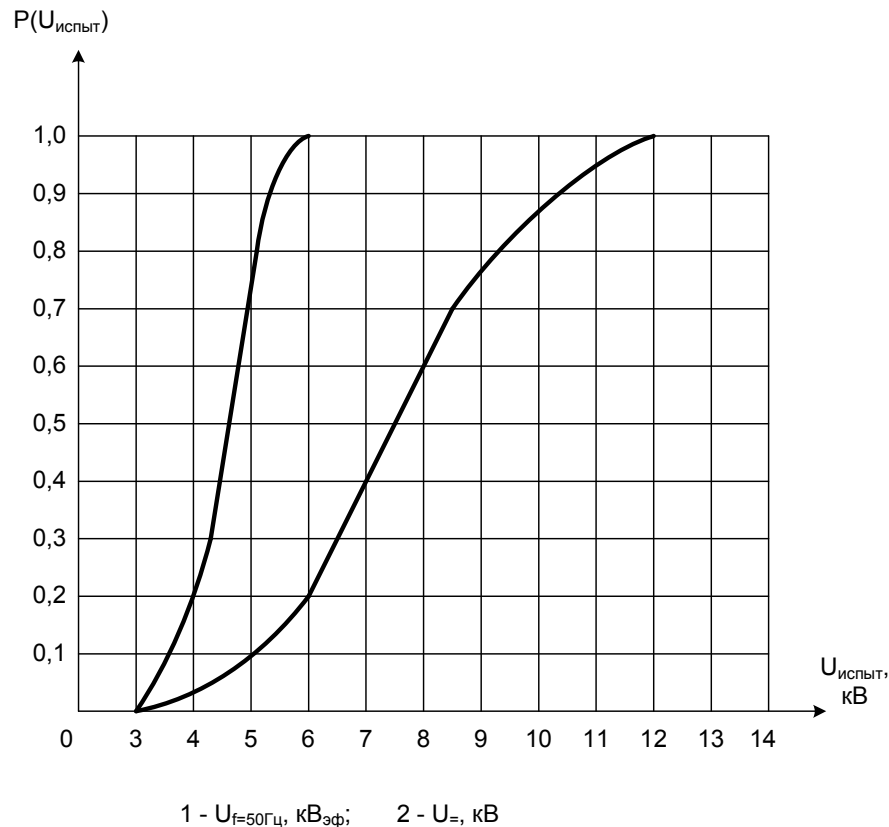


Рис. 1. Интегральные кривые распределения электрических пробоев mica-слоистой изоляции пазовых частей электродвигателей при переменном (1) и постоянном (2) напряжениях

На рис. 1 видно, что в результате диэлектрических потерь в изоляции при $U_{исп.f=50\text{Гц}}$ пробивное напряжение $\bar{U}_{проб}$ в 1,73 раза меньше, чем при $U_{исп=}$, и соответственно, $\bar{U}_{проб} =$. Вот почему продолжительность приложения испытательного напряжения $U_{исп.f=50\text{Гц}}$ надо ограничивать для снижения влияния перегрева изоляции на результат испытаний.

При постоянном испытательном напряжении пробивное напряжение при $P(U) = 0,5$ превышает номинальное в $7500/600 = 12,5$ раз. При переменном испытательном напряжении пробивное напряжение при $P(U) = 0,5$ превышает номинальное в $4700 \cdot 1,41/600 = 11$ раз.

Перенапряжения ограничены: при наличии разрядников – их характеристиками; при отсутствии разрядников – уровнем изоляции контактной системы.

Известно, что уровень изоляции контактной сети определяют поддерживающими и натяжными изолирующими подвесками. Длина пути утечки по поверхности таких подвесок зависит от зоны загрязнения по трассе и соответствующей удельной длины пути утечки $\lambda_{эф}$. В ПУЭ $\lambda_{эф}$ дается в эффективных значениях синусоидального напряжения, поэтому в случае сетей постоянного тока $\lambda_{эф} = \lambda_{эф-} \cdot \sqrt{2}$.

Вот почему для сети $U_{ном} = 600 \text{ В}$ для III зоны загрязнения $\lambda_{=} = 2,25 \cdot 1,41 \text{ см/кВ}_{\text{max}} = 3,172 \text{ см/кВ}_{\text{max}}$. Длина пути утечки по поверхности изолятора в сети 600 В будет равна

$$L_{п.у.} = U_{ном} \cdot 3,1725 = 5 \text{ кВ} \cdot 3,1725 = 15,8 \text{ см.}$$

Известно [4], что расчетный уровень изоляции определяют из уравнения

$$U_{расч} \geq (0,85 \div 0,9) U_{исп} \cdot \sqrt{2} \cdot k_i, \quad (2)$$

где $U_{исн}$ – испытательное напряжение промышленной частоты, которой изоляцию электродвигателей проверяют после периодических восстановительных ремонтов, 2,1 кВ_{эф}; k_i – коэффициент импульса изоляции, который принимают для оборудования после профилактического ремонта, равный 1,1÷1,2.

$$U_{расч} \geq (0,85 \div 0,9) \cdot 2,1 \cdot \sqrt{2} \cdot (1,1 \div 1,2) = 3,2 \text{ кВ.}$$

В последнее время на замену традиционным вентильным разрядникам пришли новые электрические аппараты – ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), которые по сравнению с разрядниками более глубоко ограничивают коммутационные и грозовые перенапряжения.

ОПН – аппарат на основе металлооксидных варисторов без искровых промежутков.

Защитных характеристик ОПН две:

1. Грозовой уровень защиты – остаточное напряжение $U_{ост.н.}$ при действии нормированного тока I_H .
2. Коммутационный уровень защиты – самая крупная из остаточных напряжений $U_{ост.н.}$ при воздействии коммутационных импульсов тока с нормативными амплитудами.

Перенапряжения на корпусной изоляции тяговых электродвигателей

Атмосферные перенапряжения, которые действуют на корпусную изоляцию, создают такие виды токов молнии:

– импульс тока с крутым фронтом (длительность фронта 1 мкс, длительность импульса 2÷20 мкс);

– импульс тока большой амплитуды с формой 4/10 мкс;

– грозовой импульс тока с формой 8/20 мкс;

– коммутационный импульс тока с формой 30/60 мкс;

– «длинный» импульс тока прямоугольной формы продолжительностью 2000÷4000 мкс.

Потери мощности при постоянном напряжении

$$P_{=} = \frac{U_{исн}^2}{R_V} . \quad (3)$$

Потери при переменном напряжении определяют по формуле:

$$P_{\approx} = U_{исн}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta . \quad (4)$$

Определим, во сколько раз отличаются потери:

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = \frac{U_{исн}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta}{U_{исн}^2 / R_V} = \omega \cdot R_V \cdot C \cdot \text{tg} \delta . \quad (5)$$

Между емкостью C и сопротивлением отрезка изоляции существует соотношение:

$$R_V \cdot C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_V . \quad (6)$$

Подставим (4) в (3) и получим величину $\frac{P_{\approx}}{P_{=}}$:

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_V \cdot \text{tg} \delta . \quad (7)$$

Известно, что произведение $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \delta = k_{д.п.}$ – коэффициент диэлектрических потерь, поэтому

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = \omega \cdot \rho_V \cdot k_{д.п.} . \quad (8)$$

Определим $k_{д.н.}$ для таких диэлектриков:

Полистирол: $\varepsilon = 2,6 \div 2,8$; $tg\delta = 12 \cdot 10^{-3}$; $\rho_V = 10^{14} \div 10^{15}$ Ом·м.

$$k_{д.н.} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot tg\delta = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м} \cdot 2,7 \cdot 12 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_V \cdot k_{д.н.} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Ом/м} \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м} \cdot 2,7 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 2390 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 28,68$$

$$\omega = 2\pi f = 3,14 \cdot 2 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$$

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = 28,68 \cdot 314 = 9000.$$

Слюда: $\varepsilon = 6,1 \div 8,4$; $tg\delta = 12 \cdot 10^{-3}$; $\rho_V = 10^{13} \div 10^{14}$ Ом·м.

$$k_{д.н.} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot (6,1 \div 8,4) \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 240 \cdot 10^{-16} = 2,4 \cdot 10^{-14}$$

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = 2,4 \cdot 10^{-14} \cdot 314 \cdot 10^{14} = 753.$$

Полиэтилен: $\varepsilon = 2,1 \div 2,4$; $tg\delta = (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$; $\rho_V = 10^{15}$ Ом·м.

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_V \cdot tg\delta = 19480 \text{ с} \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 4,87;$$

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = 4,87 \cdot 314 = 1530.$$

Стекло: $\varepsilon = 3,75 \div 8,0$; $\rho_V = 10^{14}$ Ом·м.

Фарфор: $\varepsilon = 6 \div 7$; $tg\delta = 0,03$; $\rho_V = 10^{15}$ Ом·м.

Гетинакс: $\varepsilon = 5 \div 6$; $tg\delta = 10 \cdot 10^{-2}$; $\rho_V = 10^6 \div 10^9$ Ом·м.

Таким образом, испытание изоляции переменным напряжением является опасным для изоляции по сравнению с постоянным напряжением вследствие больших потерь, энергия которых тратится на нагрев изоляции. При этом возрастает вероятность электротеплового механизма пробоя.

Выводы

1. Уровень основной изоляции электродвигателей $U_{ном} = 600$ В в 12 раз выше номинального напряжения.
2. За 12 – 15 лет эксплуатации этот уровень уменьшается в 1,5 раза, то есть в 8 раз выше номинального напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника высоких напряжений : учебник для Вузов / [под ред. Г. С. Кучинского]. – СПб : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с.
2. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 320 с.
3. Справочник по сопротивлению материалов / [Писаренко Г. С, Яковлев А. П., Матвеев В. В.] ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Киев : Наукова думка, 1988. – 736 с.
4. Собчук В. С. Координація параметрів ізоляції електрообладнання і пристроїв технічної діагностики / В. С. Собчук, В. Н. Пашенко // Вісник ВПШ. – 1995. – № 3. – С. 41 – 43.
5. Руцкий А. И. Электрические станции и подстанции. Часть 1. Основное техническое оборудование / А. И. Руцкий. – Минск, 1984. – 394 с.

Собчук Наталия Валериевна – доцент кафедры ЭСС.

Слободянюк Елена Валериевна – ст. преподаватель кафедры ИКГ.
Винницкий национальный технический университет.