



The Analysis of Influences Caused by Electric Field Irregularities upon Increased Discharge Activity in Generator Insulation

Alexey TADZHIBAEV

Petersburg power engineering institute of professional development, Saint-Petersburg, Russia;
e-mail: iecc@peipk.spb.ru

Abstract

Issues concerning the influence of electric field upon the development of flaws and insulation aging in synchronous generators were examined. The dependence of discharge effects from field irregularities in the slot and end plane winding sections was shown. Resulting dependences were obtained which allow to evaluate the level of destruction effects which lead to insulation aging.

Keywords: synchronous generator, partial discharge, electric field intensity, insulation aging.

Анализ влияния неравномерности электрического поля на повышение разрядной активности в изоляции генераторов

Алексей И. ТАДЖИБАЕВ

Существующие технологии изготовления изоляции электрических машин высокого напряжения приводят к образованию в изоляции полостей, в которые постепенно проникает атмосферный воздух. Относительно слабые частичные разряды, возникающие в таких включениях, не оказывают существенного влияния на долговечность конструкции. Однако при значительных отклонениях технологических процессов, вызываемых, например, изменениями свойств материалов или режима сушки и термопрессования, могут образоваться более грубые дефекты, не только ускоряющие электрическое старение самой изоляции, но и влияющие на другие характеристики, от которых зависит износ изоляции и от внешних воздействий в эксплуатационных условиях. Базовым аспектом, влияющим на старение и возникновение локального дефекта, является неравномерность электрического поля.

Конструкция обмотки и электрические нагрузки вращающихся машин высокого напряжения таковы, что при рабочем напряжении могут происходить поверхностные частичные разряды (ч.р.) в пазовой части и в месте выхода обмотки из паза. Такие разряды приводят к ускоренному старению изоляции, а также затрудняют высоковольтные испытания обмотки в процессе изготовления и эксплуатации машины, поэтому для устранения внешних ч.р. применяют специальные защитные меры: наносят полупроводящие покрытия (ПП) с определенным сопротивлением (ρ_3).

Краевые разряды в месте выхода обмотки из паза вызываются резкой неравномерностью электрического поля на поверхности изоляции, аналогичного полю проходного изолятора (рис. 1). Для этого случая характерно, что в зоне выхода обмотки из паза статора уже при низком напряжении возникает краевой коронный разряд, интенсивность которого быстро увеличивается с ростом напряжения, а в дальнейшем развиваются стримерные скользящие разряды. Для электрических машин высокого напряжения краем электрода, обычно, является конец пазового покрытия, выходящего

за пределы сердечника на 30-100 мм. Расчет поля в такой конструкции может быть произведен путем решения электростатической задачи, иллюстрируемой рис. 1.

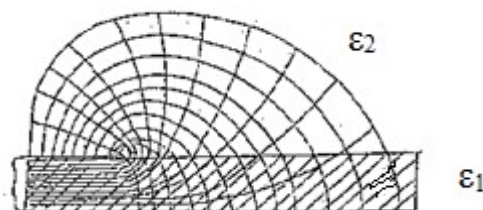


Рис. 1. Силовые линии электрического поля в любых частях обмотки

Выравнивание поля, повышение начального напряжения краевых разрядов производится с помощью лобовых полупроводящих покрытий, наносимых на поверхность изоляции от места выхода из паза. В качестве исходных параметров для анализа поля используются следующие параметры: $C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{d}$ – емкость единицы поверхности изоляции относительно внутреннего электрода меди; C_2 – взаимная емкость соседних единиц поверхности изоляции относительно друг друга (продольная емкость); d – толщина изоляции; ρ_1 – сопротивление изоляции толщиной d с единичной площадью; $\rho_2 = \rho_3$ – удельное поверхностное сопротивление изоляции.

Продольная емкость может быть представлена как доля емкости на единицу длины равной $C_2 = K \epsilon_2 \epsilon_2 d$, где $K < 1$. Если к электродам приложено напряжение U , то распределение напряжения по длине поверхности $U_x = f(x)$ в рассматриваемой конструкции может быть представлен в виде:

$$U_x = U \frac{ch[\gamma(l-x)]}{ch(\gamma l)}, \quad (1)$$

где

$$\gamma = \sqrt{\frac{1/\rho_1 + j\omega c_1}{1/\rho_2 + j\omega c_2}}. \quad (2)$$

Оценим начальное напряжение короны на краю электрода (в месте выхода обмотки из паза).

Напряженность поля вдоль поверхности изоляции:

$$E_x = -\frac{dU}{dx} = U\gamma \frac{sh[\gamma(l-x)]}{ch(\gamma l)}. \quad (3)$$

Наибольшая напряженность достигается на краю электрода 1 при $x=0$:

$$E_x = U\gamma \cdot th(\gamma l). \quad (4)$$

Коронный разряд возникает при достижении у края электрода напряженности, равной напряженности ионизации воздуха E_u . Поэтому начальное напряжение короны U_n можно найти из выражения (4), подставляя в него $E_x = E_u$, т.е.

$$U_n = \frac{E_u}{\gamma} cth(\gamma l), \quad (5)$$

где $E_u = 3200$ кВ/м.

Найдем напряжение возникновения краевых разрядов для различных конструктивных условий.

Начальное напряжение разрядов при отсутствии полупроводящего покрытия. В этом случае величина ρ_2 определяется поверхностным сопротивлением изоляции и имеет большое значение ($\rho_2 > 10^{12}$ Ом). Поэтому величиной l/ρ_2 можно пренебречь по сравнению с ωC_2 , кроме того, для сдвинутой изоляции статорных обмоток обычно $l/\rho_1 \ll \omega C_1$. Тогда параметр γ оказывается вещественным и равным согласно (2):

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = \frac{1}{d\sqrt{K}}. \quad (6)$$

Для исследуемых в работе образцов можно принять $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $K \leq 0,2$; $l = 10^{-2}$ м. Отсюда получаем $\gamma l > 5,0$, $Cth\gamma l \cong 1$ и

$$U_{н} = \frac{E_u}{\gamma} = E_u d\sqrt{K} \quad (7)$$

Разряды при наличии полупроводящего покрытия. На поверхность изоляции от края электрода 2 (рис. 1.3, а) нанесено покрытие с сопротивлением ρ_2 . В зависимости от сопротивления и длины покрытия при достаточном напряжении разряды могут возникнуть либо на краю электрода (соответствующее напряжение обозначим $U_{но}$), либо на конце покрытия ($U_{нл}$).

В первом случае, очевидно, в расчете должна учитываться относительно высокая поверхностная проводимость покрытия ($\rho_2 = 10^{-5} - 10^{-3}$ Ом) в этом случае имеет место соотношение $l/\rho_2 \ll \omega C_2$. Тогда:

$$\gamma = \sqrt{\frac{j\omega C_2 \rho_2}{d}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \rho_2}{2d}}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (5), можно найти зависимость $U_{но}$ от ρ_2 .

Второй случай аналогичен рассмотренному выше с той разницей, что величина напряжения на конце покрытия U_l связана с приложенным напряжением U , получаемым из (1), соотношением

$$U_l = \frac{U}{ch(\gamma l)}; \quad (9)$$

где γ находится из (8).

Таким образом, у конца покрытия возникает при напряжении в точке $x=l$, равном согласно (7), при этом условии по формуле (9) находим:

$$U_{нл} = E_u \cdot d\sqrt{K} \cdot ch(\gamma l), \quad (10)$$

где $U_{нл}$ – напряжение на образце, соответствующее началу короны в точке $x=l$.

Максимально возможное напряжение возникновения разрядов при заданных d , ε , l определяется точкой пересечения, построенных согласно этих кривых – $\rho_{онм}$. При любом другом сопротивлении покрытия ρ_2 разряды будут начинаться раньше либо у края электрода $\rho_2 > \rho_{онм}$, либо у конца покрытия $\rho_2 < \rho_{онм}$. Нанесение покрытия с точно заданной величиной ρ_2 весьма затруднительно по технологическим причинам, например из-за

разброса толщины покрытия, степени сушки, влияния наполнителя и др. Поэтому в практике применяются более совершенные так называемые "нелинейные" покрытия, в которых сопротивление понижается с увеличением напряженности поля, т.е. $\rho_2 = f(E)$.

Из рассмотренных зависимостей можно заключить, что понижение ρ_2 в зоне пониженной E около электрода увеличивает напряжение появления короны у края электрода $U_{но}$, а повышение ρ_2 остальной части покрытия увеличивает $U_{ил}$.

Пазовая часть секции (катушки или стержня) должна устанавливаться в паз сердечника свободно, и это условие, а также неровность и разброс в размерах паза сердечника и секции определяют существование некоторого зазора (не более 1 мм) между поверхностью изоляции и сердечником. Образуется двухслойная система *изоляция – воздух*, и легко показать, что в такой системе пробой воздушной компоненты (промежуток изоляция – сердечник) произойдет при напряжении, меньшем рабочего. Возникающие при этом интенсивные ч.р. и создаваемые ими продукты-окислители (озон, окислы азота) воздействуют на поверхность изоляции и элементы крепления обмотки, что ослабляет крепление секции, способствует образованию и усилению ее вибрации в пазу. Поэтому для устранения этих явлений на пазовую часть обмоток электрических машин на напряжение 6кВ и выше накладывают полупроводящий слой низкого сопротивления ρ_n .

Однако в этом случае при недостаточно хорошем контакте или малом числе точек контакта ПП со стенками паза создаются условия для возникновения так называемого пазового разряда. Это особенно вероятно для жесткой терморезистивной изоляции, не разбухающей в процессе эксплуатации.

"Пазовый разряд", возникающий при нарушении контакта между сердечником и пазовым покрытием, представляет собой микродугу (ток $10^{-4} - 10^{-2}$ А), через которую замыкается емкостной ток i_{mn} , протекающий через участок пазового покрытия, не контактирующий со стенками паза.

Очевидно, для предотвращения каких-либо разрядов необходимо, чтобы напряжение между сердечником и ПП покрытием не превышало минимальное напряжение пробоя газа (минимум кривой Пашена), равное для воздуха $U_{min}=350$ В (амплитудное значение). Для расчета наибольшего напряжения U между сердечником и покрытием (в середине расстояния l между точками контакта) используют формулу (1), в которой в соответствии с граничным условием $i=0$ при $x = \frac{1}{2}l$ аргумент числителя

равен 0. Учитывая далее, что для пазового покрытия $\omega C_2 \ll \frac{1}{\rho_2}$ получим

$\gamma = \sqrt{j\omega C_1 \rho_2} = (1 + j)\gamma'$, где $\gamma' = \sqrt{\frac{1}{2d} \omega \epsilon_0 \epsilon_1 \rho_2}$. Тогда для рассматриваемого случая $d=3-6$

мм, $\rho_2 \leq 10^4$ Ом, $\omega=314$; отсюда получим:

$$\Delta U = U - U_{1/2} = U \left(1 - \frac{1}{ch\gamma^{1/2}}\right) = U \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \rho_2 l^2}{8d}.$$

Формула используется для оценки максимальной величины ρ_2 пазового покрытия или для расчета напряжения (ΔU) при известных параметрах изоляции.

Таким образом, приведенные зависимости позволяют найти с одной стороны параметры пазового покрытия и покрытия в лобовых частях обмотки, с другой стороны позволяют оценить минимальное воздействие по напряжению в эксплуатационных условиях, при которых энергия активации приводит к увеличению скорости старения.

Литература

1. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. Возникновение и методы выявления дефектов. М: Энергоиздат, 1981. 255 с.
2. Пат.2038669 Российской Федерации, МКИ G01R 31/02. Устройство для контроля изоляции и защиты обмотки статора блочного генератора./ Таджикибаев А.И. (Россия), Соловьев Н.С. (Россия), Головкин С.В. (Россия) и др. Оpubл. 03.04.95 Бюл. № 18.
3. Sazhin B.I., Kaniskin V.A., Kostenko E.M., Levandovskaya Ye. V. and Tadzhibayev A.I./ Arapid Method for Determining the Servise Life of Polimerinsulated Cables// Electrical Technology, Pergamon, Elsevier Science Ltd., 1997/ – № 3. P.11-17.
4. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоиздат, 1987.