

ЛИТЕРАТУРА

1 Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 176 с.

Ин-т энергетики ГЗАО РА

07.08.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 2, 1999, с. 181-186.

УДК 621.3.013

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М.А. КАРАПЕТЯН, В.А. ГРИГОРЯН, Л.О. КАРАХАНИЯН, В.В. ВАРДАНИЯН

ЯВЛЕНИЯ В МАСЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ПУЗЫРЬКИ ГАЗА И КАПЕЛЬКИ ВОДЫ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Տաշվարկված են արանաֆորմատորային յուղում առկա գազային բջիջների և ջրի կաթիլների դեֆորմացիոն մեխանիկական ուժերը և էլեկտրական դաշտի լարվածությունները բջիջների և կաթիլների ներսում և յուղում՝ այդ ներսուսուսների նկատմամբ առանձնապես կետում, որտեղ լարվածությունն առավելագույնն է: Տաշվարկները կատարված են արտաքին հստակապես դաշտի դեպքում՝ հաշիլի առկայով բևեռացված և դեֆորմացիոն ներսուսուսների սեփական դաշտերի վախճանությունը դիպոլային սեփարդակով, սալթերի ծավալային կոնցենտրացիաների նկատմամբ:

Осуществлен расчет механических сил, деформирующих газовые пузырьки и капельки воды, содержащиеся в трансформаторном масле, а также расчет напряженностей электрического поля внутри пузырьков и капелек и в масле на границе с этими включениями в точке, где напряженность максимальна. Расчеты осуществлены при внешнем однородном поле с учетом дипольного взаимодействия собственных полей деформированных и поляризованных включений различной объемной концентрации.

Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Mechanical force calculation deforming gas bubbles and water droplets containing in transformer oil is realized. Calculation of electric field intensity inside the bubbles and water droplets and oil on the border of these inclusions at the point where the intensity is maximum is studied as well. Calculations are realized in the external homogeneous field with dipole interaction of eigen fields for deformed and polarized inclusions of diverse volume concentration.

Tables 2. Ref. 2.

В процессе эксплуатации трансформаторов, масляных выключателей, кабельных муфт и т.д. трансформаторное масло или маслонафтофильный компаунд превращаются в полидисперсные системы с дисперсной фазой в виде пузырьков газа и капелек воды. В перечисленных электротехнических устройствах масло подвергается действию внешнего неоднородного поля, что вызывает перемещение включений масла по (капельки воды) и против (пузырьки газа) направления поля.

Температурное поле в масле неоднородное, что приводит к образованию потоков масла со своими включениями внутри корпуса с разными скоростями. Это значит, что масло и его включения в различных точках пространства внутри корпуса, например трансформатора оказываются под воздействием электрического поля различной напряженности и направления. Между тем, определение точных значений напряженностей внешнего электрического поля в различных участках внутри корпуса практически не представляется возможным.

Из вышеизложенного следует, что изучить количественно реальную картину явлений в масле с инородными включениями в сложном поле существующих электротехнических устройств весьма трудно и неоправданно. Качественное же исследование явлений в полидисперсной системе можно осуществить, полагая внешнее поле однородным. При этом исключается перемещение включений под действием внешнего неоднородного поля, и задача сводится к расчету стационарного электрического поля в неоднородной среде, смоделированной полидисперсной системой.

Исследование электрического поля в жидком диэлектрике с инородными включениями представляет интерес с точки зрения оценки длительной электрической прочности соответствующей изоляции.

При исследовании электрического поля в неоднородной среде, смоделированной полидисперсной системой с эллипсоидальными включениями, в [1] получены выражения

$$E_i = \frac{\epsilon_i E_0}{\epsilon_i + (\epsilon_i - \epsilon_1)(1 - f_i)N_i}, \quad E_{i0} = \frac{\epsilon_i E_0}{\epsilon_i + (\epsilon_i - \epsilon_1)(1 - f_i)N_i},$$

$$E_{i0} = \sum \frac{f_i N_i}{\epsilon_i \epsilon_1 V_i} P_i, \quad E_{i0} = E_0 + E_{i0}, \quad P_i = V_i \epsilon_i \epsilon_1 m_i E_{i0}, \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_1(1 + f_i m_i), \quad m_i = \frac{\epsilon_i - \epsilon_1}{\epsilon_i + (\epsilon_i - \epsilon_1)(1 - f_i)N_i}, \quad i = 1, 2,$$

где E_0 , E_i , E_{i0} , E_{i0} , E_{i0} - напряженности внешнего однородного поля; внутри включений i -го сорта; в масле на границе с включением в точке y полюса (или вершины) включения; результирующего поля собственных полей поляризованных включений единицы объема в центре данного включения; поля, поляризующего данное включение; P_i - дипольный момент поляризованного включения i -го сорта; ϵ_i , ϵ_1 - диэлектрические проницаемости включений i -го сорта и масла; V_i , f_i - объем включений i -го сорта и их объемная концентрация в системе; N_i - коэффициент деполяризации включений i -го сорта по направлению E_{i0} .

Здесь рассчитывается также механическая сила, действующая на масло в точке на границе с включением, у полюса (вершины) последнего. Расчет осуществлен с использованием производной энергии электрического поля [2]:

$$F_{\text{max}} = \left. \frac{dW}{dr} \right|_{r=r_0} = \mp \varepsilon_1 \varepsilon_0 (1 + 2P_1') \frac{E_0}{a} P_1' E_0^2 \quad (2)$$

где $W = \varepsilon_1 \varepsilon_0 (E_0 + R_p)^2 / 2$, $E_p = 2P_1' / 4\pi \varepsilon_1 \varepsilon_0 r^2$, $P_1' = P_1 / N_1 \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_0$.

Таблица 1

$\pi_0(1), (2)$	t_1				Коэф. депол. N и полуось эллипса a
	0.00	0.01	0.10	0.25	
E_1/E_0	1.230	1.229	1.204	1.162	$N_1 = 1/3,$ " a = 10^{-5} м
$P_1/V_1 \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_0$	-0.696	-0.695	-0.681	-0.593	
E_p/E_0	0.000	-0.002	-0.023	-0.055	
$E_p =$ $=(E_0 + E_p)/E_0$	1.000	0.998	0.977	0.945	
ε	2.300	2.285	2.144	1.959	
$F_{\text{max}}/10^{-3} E_0^2$	-33.3	-33.1	-20.1	-13.5	
E_1/E_0	1.716	1.704	1.602	1.456	$N_1 = 0.6,$ a = $0.5 \times$ $\times 10^{-5}$ м
$P_1/V_1 \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_0$	-0.855	-0.851	-0.813	-0.758	
$F_{\text{max}}/10^{-3} E_0^2$	-148.3	-145.8	-124.3	-95.5	
E_1/E_0	2.836	2.863	3.125	3.664	$N_1 = 1/3,$ a = 10^{-5} м
$P_1/V_1 \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_0$	2.758	2.784	3.039	3.562	
E_p/E_0	0.000	0.083	0.304	0.895	
$E_p =$ $=(E_0 + E_p)/E_0$	1.000	1.028	1.304	1.895	
ε	2.300	2.364	2.998	4.358	
$F_{\text{max}}/10^{-4} E_0^2$	21.95	22.33	26.27	31.34	
E_1/E_0	7.965	8.027	8.633	9.876	$N_1 = 0.1,$ a = $1 \times$ $\times 10^{-5}$ м
ε	2.300	2.479	4.230	7.815	
$P_1/V_1 \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_0$	7.738	7.799	8.387	9.594	
$F_{\text{max}}/10^{-4} E_0^2$	51.9	52.7	60.7	78.8	

Здесь W - удельная энергия поля в масле; a - радиус шарообразного или полуось эллипсоидального включения, ориентированного по вектору E_0 ; E_n - напряженность поля диполя в масле на границе с включением.

Можно показать, что знак F_{max} на границе масло-капля воды следует принять положительным, а на границе с пузырьком газа-отрицательным.

Результаты расчета (1) и (2) для случая, когда в масле имеются только газовые пузырьки (верхняя часть табл.1) показывают, что P_1 , E_n и F_{max} направлены против внешнего поля, поэтому поляризующее пузырьки поле $E_n < E_0$, а механическая сила в масле сплющивает пузырьки газа. Приведены также некоторые результаты расчетов при предположении, что пузырьки сплющены и $N_1 = 0,6$. Здесь обращает на себя внимание тот факт, что E внутри сплющенного газового пузырька существенно выше напряженности поля шарообразного пузырька ($N_1 = 1/3$). При этом, естественно, повышается вероятность электрического пробоя пузырьков.

Результаты расчета (1) и (2), когда в масле только шаровидные ($N_2 = 1/3$) капельки воды, приведены в нижней части табл.1. Механическая сила поля отгоняет масло от капли воды, поэтому капля вытягивается и становится вытянутым эллипсоидом вращения. Там же приведены результаты расчетов при предположении, что $N_2 = 0,01$. Сопоставление результатов показывает: с вытягиванием капель воды резко увеличиваются напряженности поля в масле, что может привести к электрическому пробоею масляного промежутка между двумя соседними вдоль поля каплями воды.

Результаты расчета поля в масле, содержащем как пузырьки газа, так и капельки воды (табл.2), осуществлены с использованием выражений, взятых из [1]:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_0 + f_1 N_1 P_1' - (1 - f_1) N_1 P_1', & E_{11} &= E_0 + f_2 N_2 P_2' + [1 - (1 - f_1) N_1] P_1' \\
 E_2 &= E_0 + f_1 N_1 P_1' - (1 - f_2) N_2 P_2', & E_{12} &= E_0 + f_1 N_1 P_1' + [1 - (1 - f_2) N_2] P_2' \\
 P_1 &= V_1 \epsilon_1 \epsilon_0 m_1 (1 + D_1) E_0, & P_1' &= P_1 / V_1 \epsilon_1 \epsilon_0 E_0 \\
 P_2 &= V_2 \epsilon_2 \epsilon_0 m_2 (1 + D_2) E_0, & P_2' &= P_2 / V_2 \epsilon_2 \epsilon_0 E_0 \\
 D_i &= f_i m_i N_i, & m_i &= \frac{\epsilon_i - \epsilon_0}{\epsilon_i + (\epsilon_i - \epsilon_0)(1 - f_i) N_i}, \quad i=1,2. \\
 E_n / E_0 &= f_1 N_1 P_1' + f_2 N_2 P_2', & E_n / E_0 &= (E_{11} + E_{12}) / E_0 \\
 \epsilon &= \epsilon_0 [1 + f_1 m_1 (1 + D_1) + f_2 m_2 (1 + D_2)].
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Рассчитаны также механические силы в масле на границах с пузырьками газа и каплями воды

$$F_{1max} = -\epsilon_1 \epsilon_0 (1 - 2P_1') \frac{6}{a} P_1' E_0^2, \quad F_{2max} = \epsilon_2 \epsilon_0 (1 + 2P_2') \frac{6}{a} P_2' E_0^2.
 \tag{4}$$

В (3), дополнительно к (1) и (2), сделаны обозначения: E_{11} и E_{12} - напряженности поля в масле на границах, соответственно, с газовым пузырьком и капелькой воды у полюса (вершины) включений. Расчеты осуществлены при условии $f_1 = f_{11}$.

Таблица 2

$\pi_n(3), (4)$	$f_1 = f_{11}$				Коэф-циент N и полуось эллипса a
	0,00	0,01	0,10	0,25	
P'_1	-0,695	-0,706	-0,750	-0,853	$N_1 = N_{11} = 1/3,$ $a = 10^{-5} \text{ м}$
P'_2	2,750	2,776	2,967	3,385	
E'_x / E_0	0,000	0,007	0,074	0,211	
E'_y / E_0	1,000	1,007	1,074	1,211	
ϵ	2,300	2,348	2,810	3,750	
E'_z / E_0	1,232	1,242	1,324	1,495	
E'_{11} / E_0	2,833	2,858	3,052	3,468	
$F'_{1max} / 10^5 E_0^2$	-15,2	-35,5	-50,9	-73,5	
$F'_{2max} / 10^5 E_0^2$	3,18	22,2	25,1	32,1	
P'_1	-1,088	-1,088	-1,101	-1,144	
P'_2	7,738	7,729	7,662	7,714	
E'_x	0,000	-0,001	-0,017	-0,050	
E'_y	1,000	0,999	0,983	0,950	
E'_z	1,925	1,916	1,919	1,922	
E'_{11}	7,964	7,871	7,879	7,892	
ϵ	2,30	2,45	3,81	6,08	
$F'_{1max} / 10^5 E_0^2$	-15,63	-15,30	-16,16	-17,95	
$F'_{2max} / 10^5 E_0^2$	51,9	51,8	50,9	51,6	

Заслуживают внимания следующие результаты (нижняя часть табл. 2). Несмотря на наличие в масле газовых пузырьков, $E'_{11} > 0$ и $E'_y > E_{11}$. Однако это привело к уменьшению E в масле ($E'_{11} < E_{11}$, нижняя часть табл. 1), что является следствием уменьшения поляризирующего поля (ср. E'_{11} в нижней части табл. 1, 2). Наличие же капелек воды привело к существенному повышению напряженности поля в пузырьках газа (см. E'_1 в верхней части табл. 1 и 2).

Возросла сила сплющивания газовых пузырьков ($F_{\text{спл}}^{\text{г}}$, табл. 1 и 2) и уменьшена сила вытягивания водяных капель ($F_{\text{спл}}^{\text{в}}$, табл. 1 и 2).

В отличие от верхней части табл. 2, в нижней части принято, что газовые пузырьки сильно сплющены ($N_1 = 0,85$), а капельки воды резко вытянуты ($N_2 = 0,1$). Длины полуосей а эллипсоидов в табл. 2 выбраны ориентировочно, т.к. коэффициенты N эллипсоидов прращения определяются отношением осей a/b , которые в процессе вытягивания изменяются при неизменном объеме шара, т.е.

$$a_{\text{ш}}^3 = a_{\text{сш}}^2 b_{\text{сш}}$$

Из нижней части табл. 2 следует, что сплющивание пузырьков газа усиливает их влияние на распределение поля в исследуемой полидисперсной системе. Несмотря на наличие в системе капелек воды, результирующее поле взаимодействия отрицательное $E_{\text{в}} < 0$, а поляризирующее включения поле слабее внешнего ($E_{\text{в}} < E_{\text{вн}}$). В результате этого напряженность поля в масле E_{12} существенно меньше $E_{\text{вн}}$ (верхняя часть табл. 2). Но при этом не снижается опасность пробоя промежутков масла между соседними капельками воды. Сплющивание газовых пузырьков, однако, обуславливает резкое повышение напряженности поля в газе, что может привести к частичному пробоя этих включений, а со временем и всей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карапетян М.А. Исследование электрического поля в неоднородной среде. – Ереван: Айастан, 1980. – 216 с.
2. Կարապետյան Մ.Ա., Տակիրջանյան Գ.Գ. Էլեկտրամիջավայրի տեսական հիմունքները II մաս – Եր. Լուս, 1989. – 449 էջ

ГИУА

20.03.1998

Илл. НАН и ГИУ Армении (сер. ГН), т. ЦП, №2, 1999, с. 186-192.

УДК 621.316.933

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М.М. КАРАПЕТЯН, В.Г. ВАРТАЗАРЯН

ГРОЗОЗАЩИТА МГЭС НОВЕЙШИМИ ЗАЩИТНЫМИ АППАРАТАМИ

Միտարելված է սովորույթյալ գերադասների ֆոնդի-ի պաշտպանության անհրաժեշտությունը «ՏԷՏԻ» «Կուլմակ»-ում պատրաստված և մշակված համաշխարհային ստանդարտներին համապատասխանող նորագույն պաշտպանիչ սարքերով: Այս ներդրումը «Կուլմակ»-ում կապանովի ֆոնդի-ի ամպրոպակայանության շարժը զուգանիշները, կորակարգի շահագործման նուստիությունը և զբաղիրեն կեզեզեցնել կապանաց ծախսերը: