

## АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ОБМОТКАМИ ВН

И. Д. КУТЯВИН, Г. В. ДЕЛЬ, Л. И. ДЕЛЬ

В данной работе показана возможность использования общего исследования двухобмоточных трансформаторов, разработанного на кафедре электрических станций [2], для автотрансформаторов.

Автотрансформаторы можно рассматривать как двухобмоточные трансформаторы с разной расчетной мощностью обмоток, но в схемах электроснабжения они часто заменяют трехобмоточные трансформаторы, обладая по сравнению с ними большей экономичностью. Такую замену можно сделать во всех случаях, когда обмотки среднего (СН) и высшего (ВН) напряжений могут иметь одинаковую схему соединения и одинаковое состояние нейтрали. Поэтому только сочетание напряжения 35 кВ с более высокими напряжениями и при наличии обмотки низшего напряжения (НН) вызывает необходимость применения трехобмоточных трансформаторов.

Для повышающих блочных автотрансформаторов расчетная мощность первичной обмотки (НН) равна номинальной (проходной)  $S_n$ . Вторичная автотрансформаторная обмотка (при соотношении мощностей обмоток 100/100/100%) должна иметь суммарную расчетную мощность [1]

$$S_{p2} = S_n(2 - N), \quad (1)$$

где  $N$  — коэффициент трансформации автотрансформаторных обмоток, равный отношению среднего напряжения к высшему.

Обмотка СН (общая часть автотрансформаторной обмотки) имеет расчетную мощность, равную номинальной  $S_n$ , а дополнительная часть этой обмотки имеет расчетную мощность

$$S_{pд} = S_n(1 - N). \quad (2)$$

Отношение расчетных мощностей дополнительной  $S_{pд}$  и общей  $S_{pо}$  частей автотрансформаторной обмотки

$$\frac{S_{pд}}{S_{pо}} = 1 - N. \quad (3)$$

Для сетевых автотрансформаторов первичной является одна из автотрансформаторных обмоток СН или ВН. Суммарная расчетная мощность автотрансформаторной обмотки

$$S_{p2} = 2S_n(1 - N). \quad (4)$$



Расчетные мощности общей и дополнительных обмоток равны между собой

$$S_{po} = S_{pd} = S_n(1 - N). \quad (5)$$

Сетевые автотрансформаторы также имеют обмотку НН (компенсационную), соединенную в треугольник и предназначенную для компенсации третьих гармонических составляющих фазных магнитных потоков и напряжений [1]. По условиям термической устойчивости при однополюсных коротких замыканиях в сетях СН и ВН расчетная мощность этой обмотки должна быть не менее одной трети номинальной. Компенсационная обмотка может использоваться для питания потребителей 6—35 кВ. Тогда ее мощность может быть повышена до номинальной.

Если мощность компенсационной обмотки обозначить через  $S_k = \sigma S_n$ , где  $\sigma = 1/3 \div 1$ , то выражения (4) и (5) справедливы для  $\sigma \leq (1 - N)$ . При  $\sigma = 1$  для сетевого автотрансформатора будет справедливо выражение (1).

Для автотрансформаторной идеальной является многослойная концентрическая обмотка с отпайкой СН от перехода из одного слоя в другой.

Для повышающих блочных автотрансформаторов отношение числа слоев дополнительной  $m_d$  и общей  $m_o$  обмоток равно (при одинаковой высоте слоев обмотки)

$$\frac{m_d}{m_o} = 1 - N. \quad (6)$$

Общее число слоев в обмотке должно быть целым и пропорциональным

$$m = m_o + m_d \equiv 2 - N. \quad (7)$$

Поэтому оно должно быть кратно

$$m \equiv \frac{2}{N} - 1. \quad (8)$$

Число слоев обмотки сетевых автотрансформаторов должно быть четным и делиться пополам между общей и дополнительной обмотками.

При этих условиях число витков в слое общей и дополнительной обмоток находится в соотношении

$$\omega_o = N\omega_d. \quad (9)$$

Сечения проводов обмоток при равенстве плотностей тока будут иметь обратную зависимость

$$q_{md} = Nq_{mo}. \quad (10)$$

Равенство НС обмоток НН и СН блочного автотрансформатора соответствует (1. 18) [2], поскольку мощности обмоток равны. Равенство НС обмоток НН и ВН имеет выражение

$$q_{mn}\Delta_n = \Delta_d(Nq_{mo} + q_{md}). \quad (11)$$

Для сетевых автотрансформаторов с расчетной мощностью компенсационной обмотки

$$S_{pk} = \sigma S_n.$$

Равенство НС обмоток

$$\frac{q_{mn}\Delta_n}{\sigma} = \frac{q_{mo}\Delta_o}{1 - N} = \frac{q_{md}\Delta_d}{1 - N} = (НС)_{ном}. \quad (12)$$

При пользовании формулой (1. 19) [2] для напряжения короткого замыкания подставляется в нее номинальная НС из (3. 49) [2].



Остальные исходные соотношения для автотрансформаторов такие же, как и для двухобмоточных трансформаторов [2].

В табл. 1 и 2 приведены результаты вычисления оптимальных размеров и параметров для блочного (табл. 1) и сетевого (табл. 2) автотрансформаторов. Исходные данные:  $S_c = 200$  мва;

Таблица 1

$m_2$	Принято	7	8	9	10	12
	$m_{02} = \frac{m_2}{1-N}$	4,2	4,8	5,4	6,0	7,2
	$x_2$ из (1.52) [2], см	0,73	0,68	0,64	0,61	0,56
	$b_2$ из (1.14) „	21,0	16,4	29,8	33,1	39,7
	$b_{02}$ из (1.14) „	12,7	14,7	16,7	18,7	22,6
	$\kappa_{r2}$ из (1.54), отн. ед.	1,022	1,024	1,025	1,026	1,027
	$\psi_{02}$ из (1.84), а/см	1290	1430	1563	1690	1920
	$b_1$ } из совм. реш., см	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2
	$x_1$ } (2.38) и (2.39), см	0,31	0,28	0,27	0,26	0,24
	$\kappa_{r1}$ из (1.41), отн. ед.	1,063	1,065	1,072	1,080	1,087
	$\Delta_1$ из (1.43), а/см <sup>2</sup>	452	445	440	436	432
	$\Delta_2$ из (1.28), а/см <sup>2</sup>	506	524	540	553	575
	$d$ из (2.21), см	87	101	117	133	165
	$\varphi_1$ из (1.74), а/см	1240	1350	1490	1620	1820
	$Q_c$ из (2.24), т	161	166	176	192	252
	$h$ из (1.79), см	850	574	387	277	158
	$Q_{M1}$ из (13), т	19,3	16,6	14,1	12,3	9,8
	$Q_{M2}$ из (14) „	42,5	35,0	28,0	23,6	17,9
	$Q_{M02}$ из (14) „	23,6	19,1	15,6	13,1	10,0
	$Q_M = Q_{M1} + Q_{M2}$	61,8	51,6	42,1	35,9	27,7
	$Q_a = Q_c + Q_M$	223	218	218	228	280
	$Z_c$ из (3.8), тыс. руб.	65	67	71	78	102
	$Z_M$ из (15) „	157	134	111	97	80
	$Z = Z_c + Z_M$	222	201	182	175	182

Таблица 2

$m_2$	Принято	6	8	10	12
	$m_{02} = 0,5 m_2$	3	4	5	6
	$x_2$ из (1.52) [2], см	0,87	0,75	0,67	0,62
	$\kappa_{r2}$ из (1.54), отн. ед.	1,024	1,027	1,029	1,031
	$b_2$ из (1.14), см	20,2	27,0	33,7	40,4
	$b_{02}$ из (1.14), см	8,6	12,0	15,4	18,7
	$\psi_{02}$ из (1.54), а/см	1010	1260	1480	1700
	$b_1$ } из совмestн. решен.	2,6	3,2	4,0	4,8
	$x_1$ } (2.38) и (2.39), см	0,47	0,40	0,35	0,30
	$\kappa_{r1}$ из (1.41), отн. ед.	1,050	1,057	1,065	1,071
	$\Delta_2$ из (1.43), а/см	486	469	453	446
	$\Delta_1$ из (1.28) „	465	499	529	548
	$d$ из (2.21) „	77	107	142	176
	$\varphi_1$ из (1.74), а/см	727	900	1080	1215
	$Q_c$ из (2.24), т	132	141	184	256
	$h$ из (1.79), см	920	387	180	105
	$Q_{M1}$ из (13), т	10,5	7,10	5,34	4,44
	$Q_{M2}$ из (14) „	42,7	26,0	17,4	13,14
	$Q_{M02}$ из (14) „	18,6	11,8	7,8	6,15
	$Q_M = Q_{M1} + Q_{M2}$	53,2	33,1	22,7	17,6
	$Q_a = Q_c + Q_M$	185	174	207	274
	$Z_c$ из (3.8), тыс. руб.	53	57	74	103
	$Z_M$ из (16) „	114	77	60	45
	$Z = Z_c + Z_M$	167	134	134	148

$U_{нн} = 20$  кв;  $U_{нв} = 750$  кв;  $N = 1/3$ ;  $B = 1,70$  тл;  $S_{рк} = 0,5S_{н}$ ;  
 $K_c = 0,253 \cdot 10^{-4}$ ;  $y_1 = 1,45$ ;  $y_2 = 2,0$ ;  $\delta_1 = 0,8$ ;  $\delta_2 = 3,0$ ;  $i_1 = 0,05$ ;



$$i_2 = 0,4; \quad \alpha_1 = 25 \cdot 10^4; \quad \alpha_2 = 16 \cdot 10^4; \quad U_{\text{кнс}} = 0,10; \quad \delta_{01} = 5; \quad \delta_{12} = 5;$$

$$I_{n1} = 12; \quad I_{n2} = 28; \quad n = 3; \quad \kappa_n = 1; \quad C = 0,92.$$

Обмотка НН — винтовая или непрерывная катушечная; автотрансформаторная обмотка — многослойная концентрическая.

При вычислении данных табл. 1 и 2 в качестве допущения предполагалось, что с уменьшением высоты слоя автотрансформаторной обмотки (при трансцидальном ее сечении) увеличивается радиальный размер меди слоя  $x_2$  так, что площадь сечения меди слоя остается постоянной.

Вес меди катушечной обмотки в соответствии (2. 32) [2] определялся по формуле

$$Q_M = n\pi\gamma_M 10^{-3} h \frac{bxud_M}{(x+i)(y+\delta)} \quad (13)$$

и многослойной обмотки

$$Q_M = n\pi\gamma_M 10^{-3} h \frac{mxud_M}{y+i}. \quad (14)$$

Расчетные затраты, связанные с медью обмоток блочного автотрансформатора, в соответствии с [2] определялись по формуле

$$Z_M = \beta A Q_M + E(\kappa_{r1} \Delta_1^2 Q_{M1} + \kappa_{r2} \Delta_2^2 Q_{M02}). \quad (15)$$

При этом за расчетный режим для определения потерь в меди выбрана загрузка обмотки СН до номинальной мощности.

Для сетевого автотрансформатора при  $\sigma \ll 1-N$  расчетным режимом будет загрузка автотрансформаторных обмоток до расчетной мощности. Тогда расчетные затраты, связанные с медью обмоток сетевых автотрансформаторов при  $\sigma = 0,5$ , можно определить по формуле

$$Z_M = \beta A Q_M + \kappa_2 E \Delta_2^2 [(1-N)^2 Q_{M02} + (Q_{M2} - Q_{M02})]. \quad (16)$$

Если расчетная мощность компенсированной обмотки будет равна номинальной ( $\sigma = 1$ ), то расчетные затраты, связанные с медью обмоток сетевых автотрансформаторов, определяются из (15). При этом индекс единица относится к компенсационной обмотке и двойка — к питающей автотрансформаторной обмотке (или наоборот).

Как видно из табл. 1, оптимальное число слоев вторичной обмотки блочного автотрансформатора заданной мощности  $m_2 = 10$ ;  $m_{02} = 6$ ;  $d = 133$ ;  $h = 277$ . Для сетевого автотрансформатора (табл. 2) — при  $\sigma = 0,5$ . Оптимальное число слоев автотрансформаторной обмотки —  $m_2 = 9$ ;  $d = 125$ ;  $h = 250$ . При необходимости вывода СН из перехода одного слоя в другой можно принять  $m_2 = 10$ ;  $d = 142$ ;  $h = 180$ .

Несмотря на принятую идеализацию задачи, приведенные выше соотношения и числовой пример расчета показывают возможность использования рассматриваемого метода исследования и расчета для автотрансформаторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Петров. Электрические машины. Ч. I. ГЭИ, М., 1956.
2. И. Д. Кутявин, Г. В. Дель, Л. И. Дель. Некоторые задачи оптимизации силовых трансформаторов. Пособие по проектированию. Ротапринт, ТПИ, 1970.