

Практическое занятие №5.1 Регулирование напряжения в энергосистемах

Регулирование напряжения в энергосистеме связано с балансом реактивной мощности, который по всей системе в целом определяет некоторый уровень напряжения. Напряжения в узлах сети обычно отличаются от среднего уровня, причем это отличие связано со многими факторами: конфигурацией сети, значениями нагрузок и т. д. Допустимые отклонения напряжения на шинах потребителя, согласно ГОСТ Р 54149-2010, в нормальных режимах составляют $\pm 5\%$ и в послеаварийных (максимальные отклонения) $\pm 10\%$ от номинального напряжения потребителей.

Различают централизованное и местное регулирование напряжения. При централизованном регулировании в питающем узле одновременно поддерживаются допустимые уровни напряжения в целом для группы потребителей близлежащего района. Местное регулирование предполагает поддержание требуемых уровней напряжения непосредственно на шинах потребителя. Средствами регулирования напряжения могут служить: генераторы на электростанциях, трансформаторы с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) и без нагрузки (ПБВ), вольтодобавочные трансформаторы и линейные регуляторы, компенсирующие устройства, вырабатывающие (батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы в перевозбужденном режиме) и потребляющие (реакторы, синхронные компенсаторы в невозбужденном режиме) реактивную мощность. Кроме того, регулирование напряжения может осуществляться изменением конфигурации сети. Некоторое участие в регулировании напряжения принимают и нагрузки, снижающие потребление активной и, особенно, реактивной мощности при снижении напряжения на их шинах.

Пример решения задач

Выбрать рациональную отпайку РПН трансформатора типа ТРДН-40000/220. Нагрузка в максимальном режиме $S_H = (50 + j20)$ МВА. Исходная схема сети и схема замещения показаны на рисунке 3.1. Напряжение на высшей стороне трансформатора 205 кВ. Требуемое напряжение потребителя 6 кВ. Трансформатор имеет пределы регулирования $\pm 8 \times 1,5\%$.

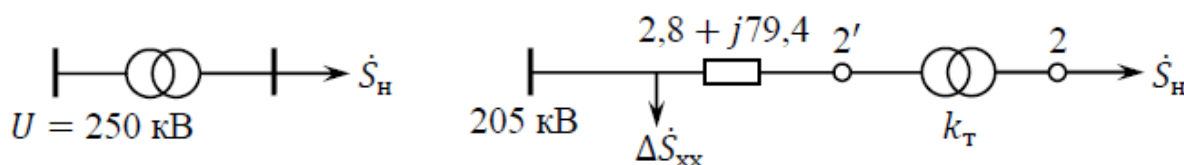


Рисунок 3.1 – Схема сети и ее схема замещения.

Решение задачи. Согласно каталожным данным номинальные напряжения трансформатора $U_{вн} = 230 \text{ кВ}$, $U_{нн} = 6,6 \text{ кВ}$, тогда коэффициент трансформации идеального трансформатора 2'2 на рисунке 3.1

$$k_T = (230 \pm 8 \times 1,5 \%) / 6,6.$$

Для выбора рациональной отпайки следует учесть падение напряжения в сопротивлении трансформатора и потери мощности, т. е. расчет сводится к итерационному процессу, так как задано напряжение в питающем узле 1 и нагрузка потребителя в узле 2. Для упрощения расчета пренебрежем потерями мощности в трансформаторе, тогда:

$$U_{2'} = U_1 - \Delta U_{12}; \Delta U_{12'} = \Delta U_{12} + j\delta U_{12}$$

$$\Delta U_{12} = \frac{PR + QX}{U} = \frac{50 \cdot 2,8 + 79,4 \cdot 20}{205} = 8 \text{ кВ};$$

$$\delta U_{12} = \frac{PX - QR}{U} = \frac{50 \cdot 79,4 - 20 \cdot 2,8}{205} = 19 \text{ кВ};$$

$$U_{2'} = 205 - 8 - j19 = 197 - j19 \text{ кВ.}$$

$$|U_{2'}| = 197,9 \text{ кВ}$$

Для обеспечения на шинах низкого напряжения трансформатора требуемого напряжения $U_{\text{треб}}$ необходимо найти требуемый коэффициент трансформации:

$$k_{\text{треб}} = U_{2'} / U_{\text{треб}} = 197,9 / 6 = 32,98.$$

Возможный коэффициент трансформации с пределами регулирования РПН $\pm n \cdot k\%$ можно записать в виде:

$$k_{\text{возм}} = \frac{U_{\text{вн}} \pm x \cdot k\% \cdot \frac{U_{\text{вн}}}{100}}{U_{\text{нн}}} = \frac{U_{\text{вн}} \pm x \cdot k(\text{кВ})}{U_{\text{нн}}}$$

Цену одной отпайки k равна 1,5 % от $U_{\text{вн}}$, т. е. 3,45 кВ;

Для выбора рациональной отпайки приравняем требуемый и возможный коэффициенты трансформации:

$$\frac{U_{2'}}{U_{\text{треб}}} = \frac{U_{\text{вн}} \pm x \cdot k(\text{кВ})}{U_{\text{нн}}}$$

$$\pm x = \frac{U_{2'} \cdot U_{\text{нн}} - U_{\text{треб}} \cdot U_{\text{вн}}}{U_{\text{треб}} \cdot k(\text{кВ})}$$

$$\pm x = \frac{197,9 \cdot 6,6 - 6 \cdot 230}{6 \cdot 3,45} = -3,56$$

Следовательно, можно выбрать четвертую ($X=-4$) или третью ($X=-3$) отпайки.

При $X=-4$ напряжение у потребителя $U_{\text{потр}} = 197,9 \cdot 6,6 / (230 - 4 \cdot 3,45) = 6,04 \text{ кВ}$, при $X=-3$ напряжение у потребителя $U_{\text{потр}} = 197,9 \cdot 6,6 / (230 - 3 \cdot 3,45) = 5,95 \text{ кВ}$.

Учитывая, что выбор отпаек производится в режиме максимальных нагрузок, следует выбрать $X=-3$, обеспечивающую слегка заниженное напряжение, так как при снижении нагрузки величина напряжения на шинах нагрузки увеличится. Выбор заниженного напряжения позволяет уменьшить число переключений РПН в сутки. При выборе отпаек в минимальном режиме следует стремиться к завышенному напряжению.

Задача для самостоятельного решения

Выбрать рациональную отпайку РПН трансформатора (исходная схема сети и схема замещения показаны на рисунке 3.1) Тип трансформатора, нагрузка, напряжение на высшей стороне трансформатора, пределы регулирования, требуемое напряжение потребителя приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные

	Тип трансформатора	Активная Мощность нагрузки P ₂ , МВт	Реактивная мощность нагрузки Q ₂ , Мвар	Напряжение на шинах высокого напряжения	Пределы регулирувания	Требуемое напряжения потребителя
1	ТМН-6300/110	5,04	3,12	106	±9×1,78	6,5
2	ТДН-10000/110	7,8	3,32	104	±9×1,78	11
3	ТДН-16000/110	12,16	6,89	113	±9×1,78	10
4	ТРДН-25000/110	20	8,52	105	±9×1,78	10
5	ТРДН-32000/110	24,64	14,62	109	±9×1,78	10,5
6	ТРДН-40000/110	32,8	20,33	113	±9×1,78	10,5
7	ТРДЦН-63000/110	52,29	22,28	111	±9×1,78	10
8	ТРДЦН-80000/110	65,6	21,56	113	±9×1,78	11
9	ТДН-16000/150	12,16	4,41	144	±8×1,5	11
10	ТРДН-32000/150	26,56	12,86	143	±8×1,5	11
11	ТМН-6300/110	5,166	1,88	110	±9×1,78	6,5
12	ТДН-10000/110	8	4,1	107	±9×1,78	10,5
13	ТДН-16000/110	13,44	6,12	117	±9×1,78	10
14	ТРДН-25000/110	21	6,9	109	±9×1,78	11
15	ТРДН-32000/110	25,28	13,64	106	±9×1,78	10,5
16	ТРДН-40000/110	30	15,37	109	±9×1,78	10
17	ТРДЦН-63000/110	52,92	24,11	107	±9×1,78	11
18	ТРДЦН-80000/110	63,2	24,98	106	±9×1,78	10,5
19	ТДН-16000/150	12,96	7,69	157	±8×1,5	11
20	ТРДН-32000/150	26,24	15,57	153	±8×1,5	11
21	ТМН-6300/110	5,103	3,16	116	±9×1,78	6,5
22	ТДН-10000/110	8,2	3,49	114	±9×1,78	11
23	ТДН-16000/110	12,8	5,06	106	±9×1,78	10,5
24	ТРДН-25000/110	18,75	10,12	117	±9×1,78	11
25	ТРДН-32000/110	26,56	15,76	112	±9×1,78	10,5
26	ТРДН-40000/110	31,6	15,3	114	±9×1,78	11
27	ТРДЦН-63000/110	49,14	26,52	115	±9×1,78	11
28	ТРДЦН-80000/110	68	42,14	114	±9×1,78	10,5
29	ТДН-16000/150	12,48	4,93	148	±8×1,5	11
30	ТРДН-32000/150	24,64	13,3	153	±8×1,5	11
31	ТМН-6300/110	5,04	2,86	103	±9×1,78	6
32	ТДН-10000/110	7,5	2,72	108	±9×1,78	10
33	ТДН-16000/110	13,6	5,38	112	±9×1,78	10
34	ТРДН-25000/110	18,75	10,63	117	±9×1,78	10
35	ТРДН-32000/110	25,92	14,69	107	±9×1,78	11
36	ТРДН-40000/110	32	10,52	116	±9×1,78	11

37	ТРДЦН-63000/110	50,4	18,29	111	$\pm 9 \times 1,78$	10
38	ТРДЦН-80000/110	63,2	26,92	106	$\pm 9 \times 1,78$	10
39	ТДН-16000/150	12,64	7,16	147	$\pm 8 \times 1,5$	10
40	ТРДН-32000/150	24	8,71	153	$\pm 8 \times 1,5$	10
41	ТМН-6300/110	4,977	1,81	112	$\pm 9 \times 1,78$	6,5
42	ТДН-10000/110	8,3	4,02	115	$\pm 9 \times 1,78$	10
43	ТДН-16000/110	13,6	7,71	112	$\pm 9 \times 1,78$	11
44	ТРДН-25000/110	21,25	7,71	110	$\pm 9 \times 1,78$	10,5
45	ТРДН-32000/110	25,6	10,91	109	$\pm 9 \times 1,78$	10,5
46	ТРДН-40000/110	30	9,86	106	$\pm 9 \times 1,78$	10,5
47	ТРДЦН-63000/110	53,55	31,77	113	$\pm 9 \times 1,78$	10,5
48	ТРДЦН-80000/110	63,2	28,79	108	$\pm 9 \times 1,78$	11
49	ТДН-16000/150	12,48	5,32	157	$\pm 8 \times 1,5$	10,5
50	ТРДН-32000/150	24,96	14,15	143	$\pm 8 \times 1,5$	11

ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Таблица 1 – Трехфазные двухобмоточные трансформаторы 110 кВ

Мощность $S_{НОМ.ТР}$, МВА	Тип трансформатора	Пределы регулирующего напряжения, %	Каталожные данные						Расчётные данные		
			$U_{НОМ}$, кВ		u_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I_x , %	$R_{ТР}$, Ом	$X_{ТР}$, Ом	ΔQ_x , квар
			В	Н							
2,5	ТМН-2500/110	$\pm 10 \times 1,5$ $\pm 8 \times 1,5$	110	6,6; 11; 22	10,5	22	5	1,50	46,60	555,0	37,5
4,0	ТМН-4000/110	$\pm 9 \times 1,78$	115	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	ТМН-6300/110	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,6; 11; 22; 38,5	10,5	33,5	11,5	1,00	16,60	220,0	63
10	ТДН-10000/110	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,6; 11; 22; 38,5	10,5	60	14	0,90	7,95	189,0	90
16	ТДН-16000/110	$\pm 9 \times 1,78$	116	6,6; 11; 22; 38,5	10,5	85	21	0,86	4,38	86,7	136
25	ТРДН-25000/110	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	120	29	0,80	2,54	55,9	200
32	ТРДН-32000/110	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	145	35	0,75	1,87	43,5	240
	ТРДНС-32000/110 *	$\pm 9 \times 1,78$	115	8,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5 (16)	145	35	0,75	1,87	66,0	240
40	ТРДН-40000/110 *	$\pm 9 \times 1,78$	115	8,3/6,3; 6,3/10,5	10,5	175	42	0,70	1,44	34,8	280
	ТРДНС-40000/110 *	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5 (16)	175	42	0,70	1,44	52,8	280
	ТД-40000/110	$\pm 2 \times 2,5$	115	6,3; 10,5; 3,15	10,5	175	52	0,70	1,44	34,8	280
63	ТРДЦН-63000/110 *	$\pm 9 \times 1,78$	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5 (15)	260	59	0,66	0,87	22,0	410
80	ТРДЦН-80000/110 *	$\pm 9 \times 1,78$	121	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,6 (15)	315	70	0,60	0,65	17,3	480
	ТД-30000/110	$\pm 2 \times 2,5$	121	6,3; 10,5; 13,8; 3,15	10,6	315	70	0,60	0,65	17,3	480
125	ТДЦ-125000/110	$\pm 2 \times 2,5$	121	10,5; 13,8	10,5	520	120	0,55	0,33	11,1	678
200	ТДЦ-200000/110	$\pm 2 \times 2,5$	121	15,75; 13,8; 18; 20	10,5	700	170	0,50	0,23	6,95	1000
256	ТДЦ-250000/110	$\pm 2 \times 2,5$	121	15,75; 20	10,5	790	200	0,50	0,17	5,55	1250
400	ДЦ-400000/110	$\pm 2 \times 2,5$	121	20	10,5	1350	230	0,80	0,12	3,47	3200

Таблица 2 – Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 150 кВ

Мощность $S_{\text{НОМ.ТР}}$, МВА	Тип трансформатора	Пределы регулирования напряжения, %	Каталожные данные						Расчетные данные		
			$U_{\text{НОМ}}$, кВ		$u_{\text{К}}$, %	$\Delta P_{\text{К}}$, кВт	$\Delta P_{\text{Х}}$, кВт	$I_{\text{Х}}$, %	$R_{\text{ТР}}$, Ом	$X_{\text{ТР}}$, Ом	$\Delta Q_{\text{Х}}$, квар
			В	Н							
4	ТМН-4000/150	$\pm 9 \times 1,33$	158	6,6; 11	10,5	35	10	1,20	54,60	656,0	48
16	ТДН-16000/150	$\pm 8 \times 1,5$	158	6,6; 11	11	85	21	0,80	8,30	172,0	128
32	ТРДН-32000/150*	$\pm 8 \times 1,5$	158	6,3/6,3; 10,5/10,5; 11/11	10,5; (16,5)	145	35	0,70	3,54	82,0	224
63	ТРДН-63000/150*	$\pm 8 \times 1,5$	158	6,3/10,5; 11/11	10,5; (17)	235	59	0,65	1,48	67,5	410
125	ТДЦ-125000/150	$\pm 2 \times 2,5$	165	10,5	11	380	110	0,50	0,61	22,0	625
400	ТДЦ-400000/150	–	165	20	11	930	270	0,50	0,15	6,9	2000