

УДК 621.311

УЧЕТ РЕЖИМНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Чернявская А.Г.

Научный руководитель – м.т.н., старший преподаватель Волков А.А.

Для нахождения предела и определения запасов статической устойчивости используется метод последовательного изменения (утяжеления) исходного режима с проверкой для утяжеленного режима критерия устойчивости.

Возможны случаи, когда предельный режим обуславливается не устойчивостью системы, а осуществимостью установившегося режима при заданных ограничениях:

- ограничениями уровней напряжения в точках электрической сети;
- ограничениями по длительно допустимым токам в линиях электропередачи по условию нагрева;
- ограничениями допустимой перегрузки по току или по тепловому режиму генераторов, трансформаторов и других элементов системы.

Допустимые напряжения в генераторных узлах.

Длительно допустимое отклонение напряжения не должно превышать $\pm 10\%$ номинального. При напряжении выше 105% допустимая полная мощность генератора и синхронного компенсатора должна быть установлена в соответствии с указаниями инструкций завода-изготовителя или по результатам испытаний.

Допустимые напряжения в узлах электрической сети.

Наибольшее напряжение в узлах электрической сети не должно превышать наибольшего рабочего напряжения оборудования, допустимого для соответствующего класса изоляции (таблица 1).

Таблица 1

Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ
750	787	35	40,5
330	363	10	11,5
220	252	6	6,9
110	126	3	3,5

Наибольшее и наименьшее длительно-допустимое напряжение для электрической сети напряжением 330 кВ составляет 363 кВ и 310 кВ соответственно, что составляет $+10\%$ и -6% от номинального напряжения.

Допустимое напряжение для узлов нагрузки на стороне НН в нормальном режиме находится в диапазоне $\pm 5\%$ от номинального, а в аварийном режиме и в режиме максимальных нагрузок – $\pm 10\%$ от номинального.

На рисунке 1 представлены результаты расчета режима электрической сети по узлам в нормальном режиме, а на рисунке 2 – в предельном режиме.

Название	N	Код	Uрас	dU	Pн	Qн	Pd	Qс	Uнонр	Uсхн	Uнон	Pг	Qг	Pш	Qш	Qmin	Qmax
	1	1100	110,00						115,00			-440,4	47,6			-10000	10000
	2	11	329,03	3,1					330,00		330,00						
	3	11	326,86	4,9					330,00		330,00						
	4	11	10,06	0,5	105,38	86,11			10,00	102	10,00						
	5	11	329,95	6,8					330,00		330,00						
	6	11	15,74	8,7	89,09	68,28			16,00	101	16,00						
	7	11	327,87	6,1	94,61	74,24			330,00	101	330,00						
	8	11	19,99	11,4					20,00		20,00						
	9	1010	21,10	25,4					20,00		20,00	300,0	105,0			-10000	10000
	10	1010	16,80	22,1					20,00		20,00	440,0	175,9			-10000	10000

Рисунок 1 – Результаты расчета по узлам в нормальном режиме с АРВ ПД

Название	N	Код	Uрас	dU	Pн	Qн	Pd	Qс	Unорм	Nсxn	Uном	Pг	Qг	Pш	Qш	Qmin	Qmax
	1	1100	110,00						115,00			-1118	1023,6			-10000	10000
	2	11	293,56	9,0					330,00		330,00						
	3	11	273,03	16,9					330,00		330,00						
	4	11	8,30	11,1	94,98	66,99			10,00	102	10,00						
	5	11	257,87	26,0					330,00		330,00						
	6	11	11,72	36,2	77,61	61,59			16,00	101	16,00						
	7	11	287,76	15,5	87,95	64,92			330,00	101	330,00						
	8	11	18,14	22,1					20,00		20,00						
	9	1010	21,10	37,5					20,00		20,00	300,0	223,3			-10000	10000
	10	1010	16,80	89,7					20,00		20,00	1146,3	1179,4			-10000	10000

Рисунок 2 – Результаты расчета по узлам в предельном режиме с АРВ ПД

Из рисунка 1 можно сделать вывод о том, что напряжения во всех узлах находятся в допустимых пределах. Из рисунка 2 следует, что при предельной передаваемой мощности, равной $P_{н.маx}=1146,3$ МВт, значения напряжений в узлах не находятся в допустимых пределах. Поэтому система не может работать в таком режиме.

Длительно допустимые токи в линиях электропередачи по условию нагрева.

В таблице 2 приведены значения длительно допустимых токов для различных сечений сталеалюминевых проводов с нерасщепленной фазой.

Таблица 2 - Длительно допустимые токи для неизолированных проводов (при температуре воздуха +25°C)

Марка и площадь сечения провода	Длительно допустимый ток, А	Марка и площадь сечения провода	Длительно допустимый ток, А
АС 120/19	390	АС 300/39	710
АС 150/24	450	АС 300/48	690
АС 185/29	510	АС 400/51	705
АС 240/32	605	АС 500/64	945

Для линий электропередачи напряжением 330 кВ фаза расщепляется на два провода. Соответственно в два раза увеличиваются и длительно допустимые токи.

На рисунке 3 представлены результаты расчета по ветвям нормального режима с АРВ ПД, а на рисунке 4 – результаты расчета по ветвям предельного режима с АРВ ПД.

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			329,0	441,8	-19,6	0,78			110,0	-440,4	47,6	2,32
		2	3			329,0	-68,7	-0,5	0,12			326,9	69,4	-50,3	0,15
		2	5			329,0	-229,8	1,1	0,40			330,0	231,4	-22,3	0,41
		2	7			329,0	-143,3	19,0	0,25			327,9	145,1	-53,1	0,27
		3	4			326,9	106,2	103,4	0,26			10,1	-105,4	-86,1	7,81
		3	5			326,9	-117,1	-34,9	0,22			330,0	117,8	3,4	0,21
		3	7			326,9	-58,6	-18,2	0,11			327,9	59,2	-22,2	0,11
		5	6			330,0	-349,2	18,8	0,61			15,7	350,1	-3,0	12,84
		7	8			327,9	-298,9	1,1	0,53			20,0	299,8	27,8	8,70
		9	8			21,1	300,0	105,0	8,70			20,0	-299,8	-27,8	8,70
		10	6			16,8	440,0	175,9	16,28			15,7	-439,2	-65,3	16,28

Рисунок 3 – Результаты расчета по ветвям нормального режима с АРВ ПД

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			293,6	1124,4	-741,0	2,65			110,0	-1117,5	1023,6	7,95
		2	3			293,6	-207,4	152,0	0,51			273,0	213,7	-151,3	0,55
		2	5			293,6	-682,6	504,1	1,67			257,9	707,0	-270,3	1,69
		2	7			293,6	-234,3	84,9	0,49			287,8	239,9	-88,9	0,51
		3	4			273,0	95,8	84,7	0,27			8,3	-95,0	-67,0	8,09
		3	5			273,0	-340,1	191,8	0,83			257,9	347,8	-150,2	0,85
		3	7			273,0	30,6	-125,1	0,27			287,8	-29,1	101,2	0,21
		5	6			257,9	-1054,9	420,5	2,54			11,7	1059,1	-214,4	53,25
		7	8			287,8	-298,7	-77,2	0,62			18,1	299,7	116,5	10,23
		9	8			21,1	300,0	223,3	10,23			18,1	-299,7	-116,5	10,23
		10	6			16,8	1146,3	1179,4	56,52			11,7	-1136,7	152,8	56,52

Рисунок 4 – Результаты расчета по ветвям предельного режима с АРВ ПД

В таблице 3 представим токи, полученные в результате расчетов и сравним их с длительно допустимыми токами нагрузок, приведенных в таблице 2.1. Также в таблице 2.2 приведём токи, полученные при предельной передаваемой мощности $P_{н.маx} = 1146,3$ МВт и фактическом угле $\delta=126,542^\circ$.

Таблица 3 – Сравнение расчетных и допустимых длительных токов нагрузок

Номер линии	Марка провода (с расщепленной фазой)	$I_{расч}$, А	$I_{расч.маx}$	$I_{доп}$, А
Л1	2хАС 300/39	120	510	1380
Л2	2хАС 400/51	220	830	1700
Л3	2хАС 240/32	110	270	1210
Л4	2хАС 500/64	400	1670	1890
Л5	2хАС 240/32	250	490	1210

Расчетные токи не превышают длительно допустимые по условия нагрева.

Перегрузки трансформаторов.

Допустимые систематические нагрузки не вызывают снижение срока службы трансформатора, так как за продолжительность графика нагрузки обеспечивается нормальный или пониженный против нормального расчета износ изоляции. Допустимые аварийные перегрузки вызывают повышенный по сравнению с нормальным расчетный износ трансформатора, если повышенный износ впоследствии не компенсирован нагрузками с износом изоляции ниже нормального.

Перегрузки трансформаторов рассмотрим на примере трансформатора Т1, который подключен к точкам присоединения 6 и 5 и имеет параметры: $S_{нт}=630$ МВ·А, $n_{шт}=2$.

Рассчитаем допустимую мощность для нормального и аварийного режимов:

$$S_{дон}^{норм} = K_{2c} \cdot n_{шт} \cdot S_{нт} = 1 \cdot 2 \cdot 630 = 1260 \text{ МВА};$$

$$S_{дон}^{ав} = K_{2ав} \cdot n_{шт} \cdot S_{нт} = 1,3 \cdot 2 \cdot 630 = 1638 \text{ МВА},$$

где коэффициенты $K_{2c}=1$ – для максимально допустимых систематических нагрузок; $K_{2ав}=1,3$ – для допустимых аварийных перегрузок.

Из рисунков 3 и 4 находим значения активной и реактивной мощностей для трансформатора Т1:

$$P_{T1}^{норм} = 349,2 \text{ МВт}; \quad Q_{T1}^{норм} = 18,8 \text{ Мвар};$$

$$P_{T1}^{пред} = 1054,9 \text{ МВт}; \quad Q_{T1}^{пред} = 420,5 \text{ Мвар}.$$

Далее находим значение полной мощности Т1 для нормального и предельного режимов:

$$S_{T1}^{норм} = \sqrt{(P_{T1}^{норм})^2 + (Q_{T1}^{норм})^2} = \sqrt{349,2^2 + 18,8^2} = 349,7 \text{ МВА}$$

$$S_{T1}^{пред} = \sqrt{(P_{T1}^{пред})^2 + (Q_{T1}^{пред})^2} = \sqrt{1054,9^2 + 420,5^2} = 1135,6 \text{ МВА}$$

$$S_{T1}^{норм} < S_{дон}^{норм}$$

$$349,7 \text{ МВА} < 1260 \text{ МВА}$$

$$S_{T1}^{пред} < S_{дон}^{норм}$$

$$1135,6 \text{ МВА} < 1260 \text{ МВА}$$

На рисунке 5 представлены результаты расчета по ветвям нормального режима с АРВ ПД (ремонтная схема), а на рисунке 6 – результаты расчета по ветвям предельного режима с АРВ ПД (ремонтная схема).

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Np	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			326,5	436,5	-81,5	0,79			110,0	-435,2	110,0	2,36
		2	3			326,5	-207,8	36,5	0,37			323,3	211,3	-67,7	0,40
		2	7			326,5	-228,8	44,9	0,41			324,9	232,9	-65,9	0,43
		3	4			323,3	105,5	101,1	0,26			9,9	-104,7	-84,0	7,79
		3	5			323,3	-345,3	5,2	0,62			326,7	349,6	-4,8	0,62
		3	7			323,3	28,5	-38,7	0,09			324,9	-28,0	-1,8	0,05
		5	6			326,7	-349,6	4,8	0,62			15,6	350,6	11,2	12,97
		7	8			324,9	-298,9	-5,6	0,53			19,9	299,8	35,0	8,78
		9	8			21,1	300,0	113,6	8,78			19,9	-299,8	-35,0	8,78
		10	6			16,8	440,0	192,2	16,50			15,6	-439,2	-78,6	16,50

Рисунок 5 – Результаты расчета по ветвям нормального режима с АРВ ПД (ремонтная схема)

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Np	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji	Ppj
		2	1			301,5	819,1	-618,8	1,97			110,0	-814,9	776,3	5,91	
		2	3			301,5	-439,4	381,6	1,11			260,1	467,0	-234,3	1,16	
		2	7			301,5	-379,7	237,1	0,86			283,2	395,9	-182,8	0,89	
		3	4			260,1	93,5	86,5	0,28			7,8	-92,7	-67,4	8,47	
		3	5			260,1	-752,3	340,4	1,83			247,4	789,3	-48,7	1,85	
		3	7			260,1	191,8	-192,6	0,60			283,2	-184,5	202,7	0,56	
		5	6			247,4	-789,3	48,7	1,85			11,9	791,7	60,9	38,67	
		7	8			283,2	-298,7	-84,4	0,63			17,9	299,7	125,4	10,46	
		9	8			21,1	300,0	237,0	10,46			17,9	-299,7	-125,4	10,46	
		10	6			16,8	875,1	884,9	42,77			11,9	-869,6	-122,1	42,77	

Рисунок 6 – Результаты расчета по ветвям аварийного режима с АРВ ПД (ремонтная схема)

Из рисунков 5 и 6 находим значения активной и реактивной мощностей для трансформатора Т1:

$$P_{T1(ав)}^{норм} = 349,6 \text{ МВт}; \quad Q_{T1(ав)}^{норм} = 4,8 \text{ Мвар};$$

$$P_{T1(ав)}^{пред} = 789,3 \text{ МВт}; \quad Q_{T1(ав)}^{пред} = 48,7 \text{ Мвар}.$$

Далее находим значение полной мощности Т1 для нормального и предельного режимов:

$$S_{T1(ав)}^{норм} = \sqrt{(P_{T1(ав)}^{норм})^2 + (Q_{T1(ав)}^{норм})^2} = \sqrt{349,6^2 + 4,8^2} = 349,6 \text{ МВА}$$

$$S_{T1(ав)}^{пред} = \sqrt{(P_{T1(ав)}^{пред})^2 + (Q_{T1(ав)}^{пред})^2} = \sqrt{789,3^2 + 48,7^2} = 790,8 \text{ МВА}$$

$$S_{T1(ав)}^{норм} < S_{дон}^{ав}$$

$$349,6 \text{ МВА} < 1638 \text{ МВА}$$

$$S_{T1(ав)}^{пред} < S_{дон}^{ав}$$

$$790,8 \text{ МВА} < 1638 \text{ МВА}$$

Из полученных расчетов можно сделать вывод о том, что перегрузки трансформаторов не превышают допустимых значений.

Ограничения по реактивной мощности генераторов

Величина вырабатываемой реактивной мощности определяется номинальной величиной $\cos\varphi$, которая для отечественных генераторов обычно составляет 0,8...0,9.

Определим максимальную реактивную мощность для генератора ТГВ-300-2У3 с $S_{max}=367 \text{ МВА}$ и $\cos\varphi=0,85$. Данные взяты из [1]:

$$Q_{max} = S_{max} \cdot \sin\varphi = 367 \cdot 0,5268 = 193,336 \text{ Мвар}.$$

Минимальная реактивная мощность приближенно находится из условия:

$$Q_{min} = -0,4 \cdot Q_{max}$$

$$Q_{min} = -0,4 \cdot 193,336 = -77,334 \text{ Мвар}.$$

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			329,0	441,8	-19,6	0,78			110,0	-440,4	47,6	2,32
		2	3			329,0	-68,7	-0,5	0,12			326,9	69,4	-50,3	0,15
		2	5			329,0	-229,8	1,1	0,40			330,0	231,4	-22,3	0,41
		2	7			329,0	-143,3	19,0	0,25			327,9	145,1	-53,1	0,27
		3	4			326,9	106,2	103,4	0,26			10,1	-105,4	-86,1	7,81
		3	5			326,9	-117,1	-34,9	0,22			330,0	117,8	3,4	0,21
		3	7			326,9	-58,6	-18,2	0,11			327,9	59,2	-22,2	0,11
		5	6			330,0	-349,2	18,8	0,61			15,7	350,1	-3,0	12,84
		7	8			327,9	-298,9	1,1	0,53			20,0	299,8	27,8	8,70
		9	8			21,1	300,0	105,0	8,70			20,0	-299,8	-27,8	8,70
		10	6			16,8	440,0	175,9	16,28			15,7	-439,2	-65,3	16,28

Рисунок 7 – Результаты расчета по ветвям нормального режима с АРВ ПД

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			306,6	853,7	-510,3	1,87			110,0	-849,9	653,7	5,63
		2	3			306,6	-154,4	102,2	0,35			291,8	157,6	-126,4	0,40
		2	5			306,6	-306,6	38,2	0,58			305,6	309,7	-38,0	0,59
		2	7			306,6	-392,8	369,9	1,02			273,3	415,5	-279,1	1,06
		3	4			291,8	99,3	87,0	0,26			8,9	-98,5	-70,2	7,81
		3	5			291,8	-41,7	-140,1	0,29			305,6	42,6	117,1	0,24
		3	7			291,8	-215,2	179,5	0,55			273,3	222,4	-172,7	0,59
		5	6			305,6	-352,3	-79,1	0,68			14,7	353,3	97,3	14,35
		7	8			273,3	-723,7	387,9	1,73			14,8	729,4	-88,2	28,62
		9	8			21,1	731,9	747,0	28,62			14,8	-729,4	88,2	28,62
		10	6			16,8	440,0	300,0	18,30			14,7	-439,0	-160,3	18,30

Рисунок 8 – Результаты расчета по ветвям предельного режима с АРВ ПД

Из рисунков 7 и 8 можно сделать вывод о том, что минимальная и максимальная реактивные мощности генераторов для нормального режима находятся в допустимых пределах, а в для предельного – нет.

Снизим предел передаваемой мощности до значения, при котором максимальная и минимальная реактивные мощности генератора находятся в допустимых пределах. Результаты, полученные при снижении предела передаваемой мощности, покажем на рисунках 9 и 10.

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			326,0	589,2	-87,8	1,05			110,0	-587,4	136,0	3,16
		2	3			326,0	-99,3	13,6	0,18			322,7	100,5	-60,4	0,21
		2	5			326,0	-254,8	6,2	0,45			326,9	256,7	-22,9	0,46
		2	7			326,0	-235,0	68,0	0,43			322,0	239,6	-86,2	0,46
		3	4			322,7	105,4	100,7	0,26			9,9	-104,5	-83,6	7,78
		3	5			322,7	-92,3	-49,3	0,19			326,9	92,8	17,5	0,17
		3	7			322,7	-113,5	9,0	0,20			322,0	114,8	-44,4	0,22
		5	6			326,9	-349,6	5,4	0,62			15,6	350,5	10,6	12,97
		7	8			322,0	-448,0	58,3	0,81			19,4	449,5	8,3	13,37
		9	8			21,1	450,0	190,7	13,37			19,4	-449,5	-8,3	13,37
		10	6			16,8	440,0	191,5	16,49			15,6	-439,2	-78,1	16,49

Рисунок 9 – Результаты снижения предела передаваемой мощности

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Ppi	Qpi	Uj	Pji	Qji	Iji
		2	1			331,3	143,1	31,6	0,26			110,0	-142,2	-25,0	0,76
		2	3			331,3	-6,7	-10,8	0,02			329,1	7,1	-42,9	0,08
		2	5			331,3	-180,9	-3,5	0,32			331,9	181,9	-23,9	0,32
		2	7			331,3	44,5	-17,3	0,08			329,9	-43,9	-24,5	0,09
		3	4			329,1	106,7	104,8	0,26			10,1	-105,8	-87,5	7,83
		3	5			329,1	-165,8	-24,7	0,29			331,9	167,0	-3,4	0,29
		3	7			329,1	52,0	-37,3	0,11			329,9	-51,4	-3,9	0,09
		5	6			331,9	-348,9	27,4	0,61			15,8	349,9	-11,6	12,77
		7	8			329,9	0,3	-46,6	0,08			20,3	-0,0	48,8	1,39
		9	8			21,1	0,0	50,7	1,39			20,3	0,0	-48,8	1,39
		10	6			16,8	440,0	166,1	16,16			15,8	-439,2	-57,1	16,16

Рисунок 10 – Параметры режима при P_г = 0

Литература

1. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.