

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПРИ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Горбачевский А.М., Мячин А.В.

Научный руководитель – старший преподаватель Мышковец Е.В.

1. Компенсирующие устройства

Компенсирующие устройства (КУ) в зависимости от их типа и режима работы могут генерировать или потреблять реактивную мощность, компенсируя её дефицит или избыток в электрической сети, уменьшать или увеличивать индуктивное сопротивление. Например, включение КУ в какой-либо точке сети изменяет реактивную составляющую нагрузки.

Так, в результате включения КУ, генерирующих или потребляющих реактивную мощность (например, СК или СТК), изменяется передаваемая по участкам сети реактивная мощность и, следовательно, потери напряжения:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q \pm Q_{ky}) \cdot X}{U} \quad (1)$$

Создаются возможности регулирования напряжения в узлах сети и на зажимах электропотребителей:

$$U_{i+1} = U_i \pm \Delta U \quad (2)$$

При этом при включении компенсирующих устройств в электрическую сеть они потребляют из сети некоторую активную мощность, которая в случае приближённых расчётов не оказывает существенного влияния на результаты. Рассмотрим устройства компенсирующие реактивную мощность, а именно: батареи статических конденсаторов (БСК), шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы (СТК) и синхронные компенсаторы (СК).

2. Батареи статических конденсаторов (БСК):

БСК является источником реактивной мощности. Они собираются из отдельных конденсаторов путем параллельного и последовательного соединения для обеспечения необходимой реактивной мощности и напряжения соответственно. В настоящее время БСК поперечной компенсации применяются в сетях напряжений до 110 кВ включительно. Особенно большое распространение они нашли в сетях промышленных предприятий. Реактивная мощность, генерируемая конденсаторной батареей (КБ), квадратично зависит от напряжения:

$$Q_{БСК} = 3 \cdot \omega \cdot C_{БСК} \cdot U_{\phi}^2 = \omega \cdot C_{БСК} \cdot U^2 \quad (3)$$

где $C_{БСК}$ - ёмкость конденсаторной батареи, Ф; ω - угловая частота, рад.

КБ задают в точке её присоединения ёмкостной (отрицательной) нагрузкой. Однако необходимо учитывать основной технический недостаток конденсаторов - отрицательный регулирующий эффект: значительное уменьшение генерации (выдачи) реактивной мощности КБ при снижении напряжения на её зажимах.

Приведем сравнительные расчеты режима сети в программах Mathcad и Rastr. Для расчета без учета компенсирующих устройств в Mathcad используем известные нам формулы:

$$\Delta P = \frac{(P_i^2 + Q_i^2) \cdot R}{U_i^2} \quad (4)$$

$$\Delta Q = \frac{(P_i^2 + Q_i^2) \cdot X}{U_i^2} \quad (5)$$

$$S_{i+1} = S_i - \Delta S \tag{6}$$

$$\Delta U = \frac{P_{i+1} \cdot R + Q_{i+1} \cdot X}{U_i} \tag{7}$$

$$U_{i+1} = U_i - \Delta U \tag{8}$$

Используем схему сети с номинальным напряжением $U_{ном} = 10.5кВ$, с линиями длиной $l = 10км$ и марка проводов которых АС-95/16.

2.1 Расчет без применения БСК

Поместите сюда заголовок колонки для группировки по этой колонке																			
	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	Р_н	Q_н	Р_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	10					3,4	1,6					10,50		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		10			3,0	1,5							9,31	1,41	

Рисунок 1. Данные расчета в Rastr без применения БСК.

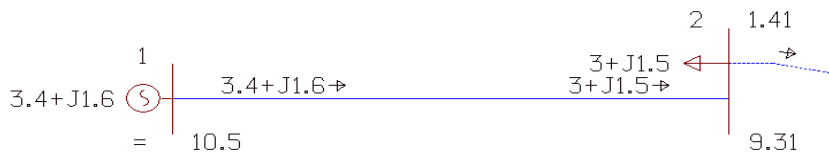


Рисунок 2. Схема сети в Rastr без применения БСК.

2.2. Расчет сети, где БСК задано с помощью реактивной мощности.

Для расчета в Mathcad с учетом БСК вместо формулы (7) используем формулу (1).

Поместите сюда заголовок колонки для группировки по этой колонке																			
	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	Р_н	Q_н	Р_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	10					3,3	0,1					10,50		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		10			3,0	1,5		1,5					9,46	-1,44	

Рисунок 3. Данные расчета в Rastr с $Q_{БСК}$

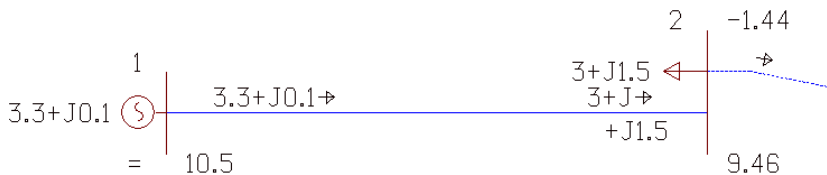


Рисунок 4. Схема сети в Rastr с $Q_{БСК}$.

2.3 Расчет сети, где БСК задано через емкостную проводимость батареи:

Емкостную проводимость батареи $B_{БСК}$ находим по формуле :

$$B_{БСК} = \frac{Q_{БСК}}{U_2^2} \tag{9}$$

Поместите сюда заголовок колонки для группировки по этой колонке																			
	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	Р_н	Q_н	Р_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	10					3,3	0,1					10,50		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		10			3,0	1,5							-16 000,0	9,46	-1,44

Рисунок 5. Данные расчета в Rastr с $B_{БСК}$

Расчеты сети в программе Mathcad для пунктов 1.2 и 1.3 будут идентичные. Результаты расчета в программе Mathcad:

Таблица 2.1.

U_2 без БСК в Raстр, кВ	U_2 без БСК в Mathcad, кВ	U_2 с $Q_{БСК}$ в Raстр, кВ	U_2 с $B_{БСК}$ в Raстр, кВ	U_2 с БСК в Mathcad, кВ
9.31	9.46	9.46	9.46	9.56

3. Шунтирующие реакторы (ШР):

Шунтирующий реактор (реактор поперечного включения) - это статическое электромагнитное устройство, применяемое в электроэнергетических системах для регулирования реактивной мощности, напряжения и компенсации емкостных токов на землю. Обладает преимущественно индуктивным сопротивлением. Шунтирующие реакторы изготавливаются на напряжения 35-750 кВ. Во включенном состоянии реактивная мощность, потребляемая реактором, зависит (в зоне линейности его электромагнитной характеристики) от квадрата напряжения:

$$Q_{ШР} = U^2 \cdot B_{ШР} \tag{10}$$

где $B_{ШР}$ - индуктивная проводимость реактора.

Они подключаются к началу и концу, а иногда и в промежуточных токах длинных линий.

3.1 Расчет сети без учета ШР.

Используем схему сети с номинальным напряжением $U_{ном} = 110кВ$, с линиями длиной $l = 100км$, марка проводов которых АС-95/16.

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	Р_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	110					64,4	74,7					110,00		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		110											86,33	-1,54	
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	3		110			40,0	40,0							62,64	-4,25	

Рисунок 5. Данные расчета в Raстр без применения ШР

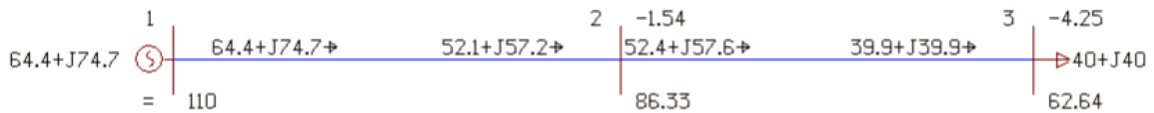


Рисунок 6. Схема сети в Raстр без применения ШР.

3.2 Расчет сети с учетом шунтирующего реактора ($Q_{ШР}$)

Для расчета участка 2-3 в Mathcad используем известные нам формулы, но для потерь напряжения используем формулу (1), а для потерь активной и реактивной мощности формулы:

$$\Delta P = \frac{(P_2^2 + (Q_2 - Q_{ШР})^2) \cdot R}{U_i^2} \tag{11}$$

$$\Delta Q = \frac{(P_2^2 + (Q_2 - Q_{ШР})^2) \cdot X}{U_i^2} \tag{12}$$

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	Р_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	110					55,5	78,0					110,00		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		110				56,0							86,90	-0,06	
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	3		110			40,0								78,39	-7,38	

Рисунок 7. Расчет сети с учетом шунтирующего реактора в Raстр ($Q_{ШР}$).

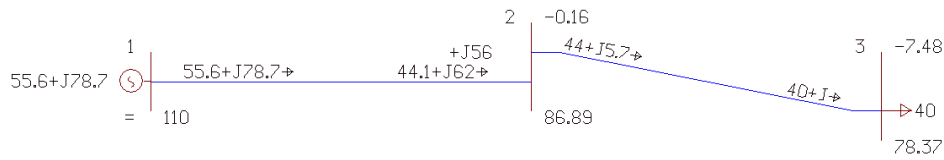


Рисунок 8. Схема сети с учетом шунтирующего реактора в Rastr ($Q_{ШР}$).

2.3 Расчет сети с учетом шунтирующего реактора ($B_{ШР}$)

Исходя из формулы (10) находим $B_{ШР}$.

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1			База	1	=	110					55,5	78,0					110,00		
2			Нагр	2		110										7 415,0	86,90	-0,06	
3			Нагр	3		110			40,0								78,39	-7,38	

Рисунок 9. Расчет сети с учетом шунтирующего реактора в Rastr ($B_{ШР}$)

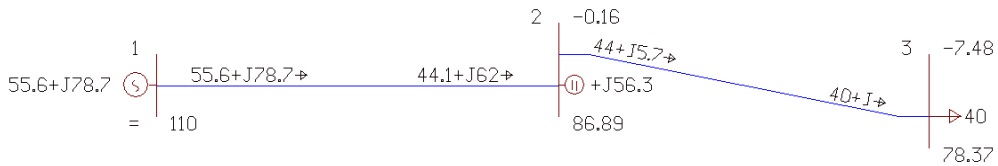


Рисунок 10 Схема сети с учетом шунтирующего реактора в Rastr ($B_{ШР}$)

Таблица 3.1

U_3 без ШР в Rastr, кВ	U_3 без ШР в Mathcad, кВ	U_3 с учетом $Q_{ШР}$ в Rastr, кВ	U_3 с учетом $B_{ШР}$ в Rastr, кВ	U_3 с учетом ШР в Mathcad, кВ
62.64	72.516	78.37	78.37	84.03

4. Статические тиристорные компенсаторы (СТК)

СТК - это комплексные устройства, предназначенные как для выдачи, так и потребления реактивной мощности. СТК за счёт тиристорного управления обладают исключительным быстродействием и осуществляют плавное регулирование реактивной мощности. Устанавливаются на подстанциях энергосистем, имеют мощность 100, 150, 250, 300 и 400 Мвар и номинальные напряжения 10; 15,75; 20; 35; 110 кВ. СТК имеют различные схемы подключения к высоковольтной сети и управления потребляемой реактивной мощностью. Основу СТК составляют накопительные элементы (ёмкости, индуктивности), реакторно-тиристорные и конденсаторно-тиристорные блоки.

Для примера мы используем сеть номинальным напряжением $U_{ном} = 100 \text{ кВ}$, длина участков: $l = 100 \text{ км}$, марка проводов АС-95/16. Для расчета сети используем известные нам формулы.

4.1 Расчет сети без учета СТК:

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1			База	1	=	110					24,1	15,9					110,00		
2			Нагр	2		110											97,13	-3,01	
3			Нагр	3		110			20,0	10,0							84,53	-6,93	

Рисунок 10. Данные расчета в Rastr без применения СТК

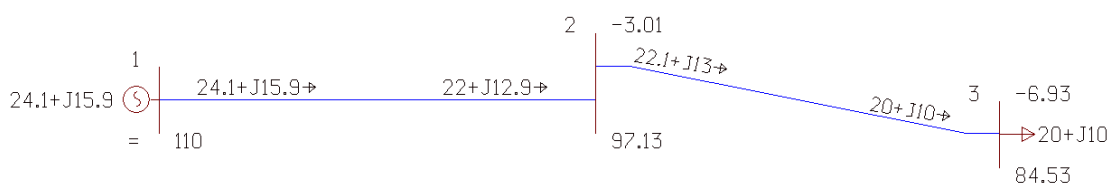


Рисунок 11. Схема сети в Rastr без применения СТК.

4.2 Расчет сети с статического тиристорного компенсатора (Q_{min}, Q_{max}):

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	110					22,7	4,6					110,00		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		110											102,17	-4,30	
3	<input type="checkbox"/>		Ген	3		110		20,0	10,0		9,3	95,0	-10,0	20,0		95,00	-9,29		

Рисунок 12. Данные расчета сети с учетом СТК

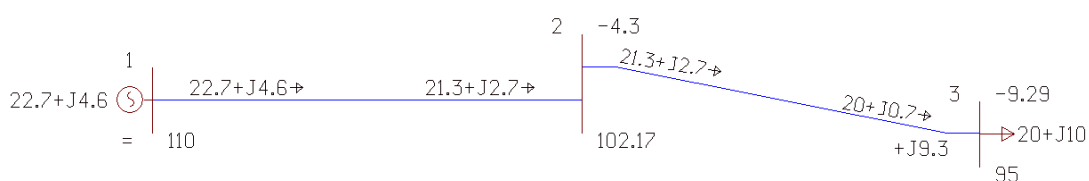


Рисунок 13. Схема сети с учетом СТК

4.3 Расчет сети с учетом статического тиристорного компенсатора ($Q_{СТК}$):

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	110					22,7	4,2					110,00		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		110											102,30	-4,36	
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	3		110		20,0	10,0		9,6					95,31	-9,40		

Рисунок 14. Данные расчета сети с учетом СТК

Таблица 4.1

U_3 без СТК в Rastr, кВ	U_3 без СТК в Mathcad, кВ	U_3 с учетом $Q_{СТК}$ в Rastr, кВ	U_3 с учетом Q_{min}, Q_{max} в Rastr, кВ	U_3 с учетом СТК в Mathcad, кВ
84.53	85.462	95.31	95	94.2

5. Синхронные компенсаторы (СК)

СК представляют собой синхронные двигатели, работающие вхолостую без механической нагрузки. В зависимости от тока возбуждения они могут вырабатывать реактивную мощность и потреблять ее. Мощность СК определяется выражением:

$$Q_{СК} = \frac{E - U_{СК}}{X_{СК}} \cdot U_{СК} \tag{13}$$

где E - ЭДС синхронного компенсатора, зависящая от тока возбуждения; $U_{СК}$ - напряжение сети в точке подключения СК; $X_{СК}$ - индуктивное сопротивление СК. Представляется возможность стабилизировать напряжение в точке подключения СК и регулировать его в небольших пределах, управляя балансом реактивной мощности:

$$0,95 \cdot U_{ном} \leq U_{СК} \leq 1,05 \cdot U_{ном} \tag{14}$$

Основное достоинство СК заключается в положительном регулирующем эффекте, т. е. в возможности плавно увеличивать выработку реактивной мощности и в результате стабилизировать или повысить напряжение при его снижении в часы максимума нагрузки или при аварии в электроэнергетической системе. Причём скорость (инерционность) регулирования определяется системой АРВ. Таким образом, СК обладает возможностями и конденсатора, и реактора: при работе в режиме перевозбуждения СК является генератором реактивной мощности, а в режиме недовозбуждения - потребителем (рис. 5.1)

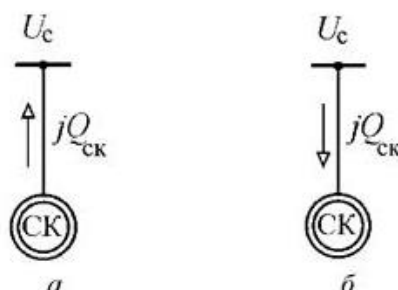


Рисунок 15. Работа СК : а – в режиме перевозбуждения ; б – в режиме недовозбуждения.

Вместе с тем СК - это крупная вращающаяся электрическая машина мощностью до 320 Мвар, требующая высокого уровня эксплуатации, в частности, обеспечивать устойчивость параллельной работы СК в электроэнергетической системе. Работа СК сопровождается заметными потерями электроэнергии и расходом вспомогательных материалов.

Для примера мы используем сеть номинальным напряжением $U_{ном} = 35кВ$, длина линии $l = 100км$, марка провода : АС-95/16.

5.1 Расчет сети без учета СК:

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	35					1,1	1,1					35,00		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		35			1,0	1,0							32,78	-0,57	

Рисунок 16. Данные расчета в Rastr без применения СК



Рисунок 17. Схема сети в Rastr без применения СК.

5.2 Расчет сети с учетом СК(Q_{min}, Q_{max}):

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	=	35					1,0	0,4					35,00		
2	<input type="checkbox"/>		Ген	2		35			1,0	1,0		0,6	33,6	-1,0	1,0		33,58	-1,46	

Рисунок 18. Данные расчета сети с учетом СК.



Рисунок 19. Схема сети с учетом СК.

Таблица 5.1

U_2 без СК в Rastr, кВ	U_3 без СК в Mathcad, кВ	U_{3c} с учетом $Q_{СК}$ в Rastr, кВ	U_{3c} с учетом Q_{min}, Q_{max} в Rastr, кВ	U_3 с учетом СК в Mathcad, кВ
32.78	32.87	33.58	33.58	33.71

Вывод: проведенный нами опыт показывает, что при использовании компенсирующих устройств мы можем либо потреблять излишки реактивной мощности, либо добавлять ее недостаток. За счет этих действий мы можем уменьшить наши потери напряжения в линиях, также потери активной и реактивной мощности. За счет этого мы можем получить напряжение в конце линии значительно больше. Так же стоит заметить, что способ задачи данных компенсирующих устройств не влияет на их конечные данные.

Литература

1. Дайнеко, А.И. Вводный курс в RastrWin/ А.В. Василенская, М.А. Костюкович; под ред. А.И. Дайнеко. – Москва: Мир, 2014. – 232с.
2. Электрические системы и сети: Учебник / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев - Мн.: УП "Технопринт", 2004.