

В.С. Чуприков

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Рассматривается комплекс программ, предназначенных для расчета параметров оборудования и характеристик статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (СТК), реализуемый на персональном компьютере. Решены вопросы выбора номинальной мощности СТК для дуговых печей, расчета частотных характеристик фильтрокомпенсирующих цепей и определения номинальных параметров силового оборудования.

Высокая эффективность, функциональная гибкость и быстрый срок окупаемости статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (СТК) обеспечили их широкое применение в системах электроснабжения промышленных предприятий и на подстанциях линий электропередач высокого напряжения. При проектировании СТК необходимо решать вопросы выбора его мощности, схемы, параметров оборудования и т.п. До сих пор в нашей стране отсутствуют утвержденные нормативные документы и методики, позволяющие провести весь объем необходимых работ по проектированию СТК.

Ниже рассматривается разработанный автором комплекс программ, предназначенных для расчета параметров оборудования и характеристик СТК, реализуемый на персональном компьютере. Все программы имеют одинаковый состав файлов: файл исходных данных, исполняемый файл, файл результатов (текстовый) и файлы данных для построения графиков в стандартном графическом редакторе.

На рис. 1 представлена типовая схема электроснабжения предприятия с мощными дуговыми сталеплавильными печами (ДСП) и установленным на шинах нагрузки СТК.

В состав силового оборудования СТК входит тиристорно-реакторная группа (ТРГ), являющаяся плавнорегулируемым потребителем реактивной мощности, и набор фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), обеспечивающих генерацию реактивной мощности на частоте сети и фильтрацию высших гармоник ДСП и ТРГ.

Первой задачей проектирования СТК является выбор номинальной мощности ТРГ и ФКЦ. Эту задачу решает программа "Фликер". Файл исходных данных

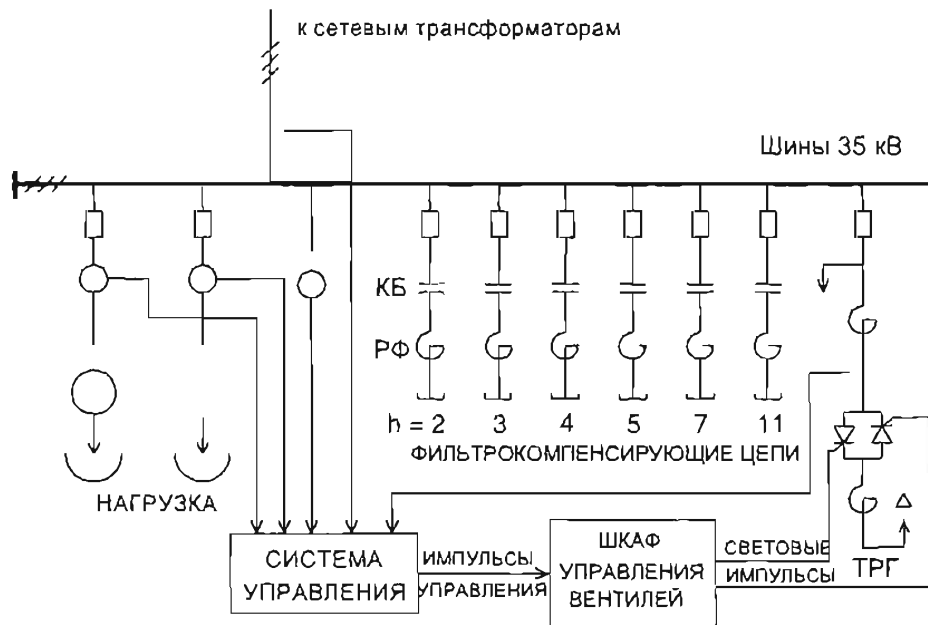


Рис. 1. Типовая схема электроснабжения предприятия с ДСП и СТК

содержит следующие параметры: номинальное напряжение шин ДСП, минимальная мощность КЗ энергосистемы в точке подключения, минимальная мощность КЗ шин ДСП, номинальная мощность ДСП, кратность тока эксплуатационного КЗ, коэффициент мощности нагрузки, число печей, максимальная реактивная мощность нагрузки, допустимое значение фликера напряжения, вид регулируемого параметра — суммарная реактивная мощность или $\lg \varphi$ и их допустимые значения. Расчет мощности фликер-компенсатора производится по стандартной методике, принятой в мировой практике [1], расчет требуемой мощности ТРГ и ФКЦ — по методике, описанной в [2]. Файл результатов содержит промежуточные параметры: коэффициент фликер-компенсатора КФК, коэффициент подавления фликера КРФ, а также требуемые мощности ТРГ и ФКЦ, а при регулировании по $\lg \varphi$ — величину максимального отклонения напряжения на шинах нагрузки. Пример файла результатов приведен ниже.

ПРОГРАММА ФЛИКЕР		
Исходные данные	Вариант БМК-03	
Номинальное напряжение, кВ	35,00	
Минимальная мощность КЗ энергосистемы, МВА	1943,00	
Минимальная мощность КЗ шин ДСП, МВА	458,00	
Номинальная мощность ДСП, МВА	50,00	
Кратность тока эксплуатационного КЗ ДСП	1,95	
Число печей	1	
Максимальная реактивная мощность нагрузки, Мвар	28,50	
Допустимое значение $U_{\text{ф}}$, %	0,25	
Регулирование по суммарной реактивной мощности		
Допустимое значение уставки, Мвар	0,00	
Результаты расчета		
КРФ = 0,514	КФК = 0,546	QFK = 54,62 Мвар
Мощность ТРГ = 55,8 Мвар		Мощность ФКЦ = 55,8 Мвар

Следующая задача, решаемая программой "Режим", — расчет зависимостей от угла управления тиристорных вентилей значений токов и реактивных мощностей ТРГ и ФКЦ, а также мощности потерь в оборудовании СТК, а при подключении СТК через понижающий трансформатор — напряжения на его шинах. Эта программа, в основном, предназначена для компенсаторов, установленных на подстанциях линий передач переменного и постоянного тока. Файл исходных данных содержит следующие параметры: номинальное напряжение шин СТК, параметры схемы замещения трансформатора, индуктивность ветви ТРГ, параметры ФКЦ, параметры оборудования СТК и трансформатора, необходимые для расчета потерь.

Одной из важнейших задач проектирования СТК является выбор параметров ФКЦ — разбиение суммарной генерируемой мощности по отдельным ФКЦ и определение частот их настройки с целью получения минимальных коэффициентов несинусоидальности на шинах нагрузки (Н.Н.) и в точке подключения нагрузки к сети общего назначения (В.Н.), а также расчет электрических воздействий на оборудование ФКЦ при всех возможных конфигурациях и параметрах системы электроснабжения. Для проведения исследований частотных характеристик, определения коэффициентов несинусоидальности, расчетов токов и напряжений в различных узлах схемы используется программа "Спектр_М". Следует иметь в виду, что результаты расчетов по этой программе справедливы только для установившихся режимов.

Расчеты проводятся для однофазной схемы замещения, приведенной на рис. 2, что правомерно для симметричной трехфазной системы. Сеть высокого напряжения замещается своим активным сопротивлением R_C и индуктивностью L_C , параметры которых рассчитываются из задаваемого значения мощности КЗ системы в точке подключения. Воздушные линии замещаются активным сопротивлением R_L и индуктивностью L_L . Сетевые трансформаторы замещаются активным сопротивлением R_T и индуктивностью L_T , величины которых вычисляются программой исходя из заданных параметров и количества трансформаторов. Фильтры замещаются цепочкой в виде соединенных последовательно конденсатора C_Φ и индуктивности L_Φ ; последовательно и параллельно индуктивности включены два резистора R_1 и R_2 , сопротивления которых рассчитываются програм-

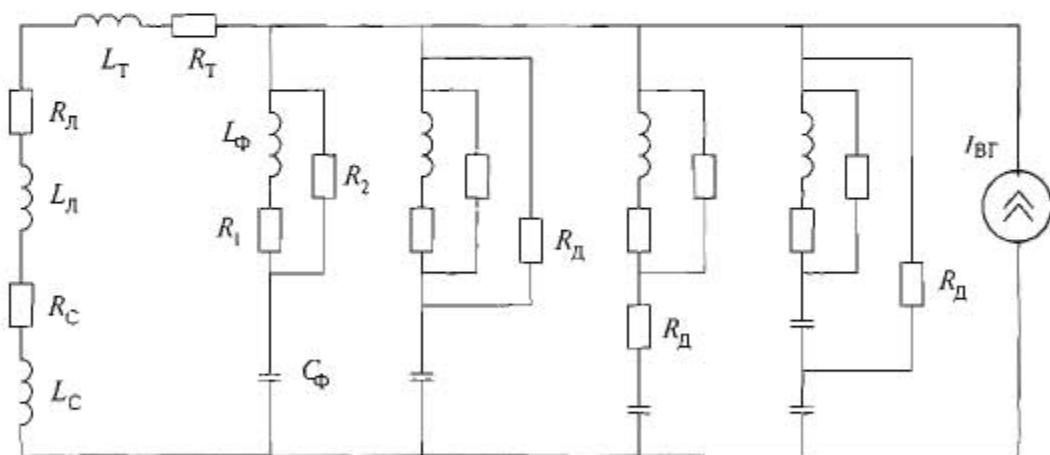


Рис. 2. Расчетная схема замещения

мой исходя из значений добротности реактора на частоте сети и частоте настройки. В программу заложены четыре возможных типа ФКЦ, отличающихся наличием и схемой подключения демпфирующего резистора R_d . Варианты схем ФКЦ приведены на рис. 2: без резистора (тип 1), включение резистора параллельно реактору (тип 2), последовательное включение (тип 3) и включение резистора в точку конденсаторной батареи, эквипотенциальную на частоте сети напряжению шин Н.Н. (тип 4) [3].

В файл исходных данных включаются следующие параметры расчета: мощность КЗ на шинах В.Н.; количество воздушных линий и сетевых трансформаторов и их параметры; значения напряжения шин Н.Н. и частоты сети, для которых производится расчет; число и параметры включенных ФКЦ; значения токов высших гармоник, генерируемых нагрузкой и ТРГ, которые задаются в табличном виде. Кроме того, задаются начало, конец и шаг расчета (в значениях относительной частоты) и виды переменных, для которых формируются файлы построения графиков.

Программа "Спектр_М" позволяет вычислять и строить графики зависимостей от частоты следующих параметров:

- модулей комплексных сопротивлений энергосистемы, фильтров и их эквивалентного сопротивления;
- коэффициентов отвлечения токов высших гармоник, генерируемых нагрузкой и ТРГ, в систему и каждую из ФКЦ.

Программа также рассчитывает и заносит в файл результатов коэффициенты несинусоидальности на шинах В.Н. и Н.Н. (индивидуальные и общий), а для каждой ФКЦ: ее генерируемую реактивную мощность, действующие значения тока первой и высших гармоник и полного тока, напряжения на конденсаторной батарее и мощность потерь в демпфирующих резисторах на частоте сети и высших гармониках. Вариантные расчеты по программе "Спектр_М" в конечном итоге позволяют получить оптимальную структуру ФКЦ.

В качестве примера работы программы "Спектр_М" приведен файл результатов (усеченный) для схемы СТК с шестью ФКЦ, а на рис. 3 — соответствующий этому же расчету график частотной зависимости коэффициента отвлечения токов высших гармоник в систему и фильтр 2-й гармоники.

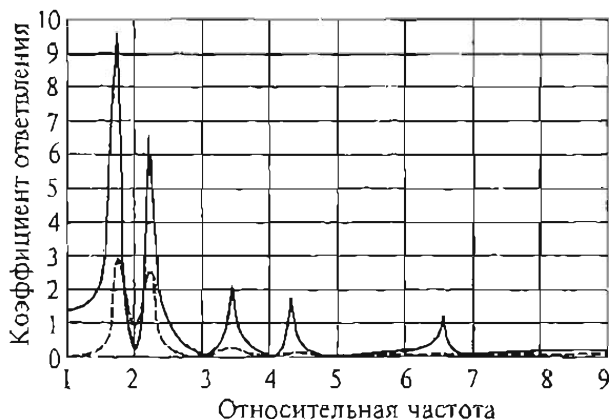


Рис. 3. Зависимость коэффициента отвлечения токов высших гармоник в систему и фильтр 2-й гармоники от частоты

ПРОГРАММА СПЕКТР_М														
Исходные данные						Вариант ММЗ35-09								
Частота сети, Гц	50.00					Напряжение, кВ	35.00							
Мощность КЗ системы, МВА	980.0					Количество фаз	2							
Реактанс линии, Ом	0.32					Число линий	2							
Мощность трансформатора, МВА	63.0					Число трансформаторов	4							
Мощность потерь тр-ра, кВт	245.0					U _к , %	10.5							
Параметр/частота настройки	S	F	E	O		2	3	4	5	7	11			
Включенные ФКЦ						1	1	1	1	1	1			
Тип ФКЦ						4	4	1	1	1	2			
График	0	0	0	1		1	0	0	0	0	0			
Токи гармоник нагрузки														
v	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I, А	53	66	26	40	12	13	7	9	6	7	5	6	3	4
Токи гармоник ТРГ														
v	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I, А	0	90	0	132	0	66	0	5	0	26	0	19	0	0
Число включенных ФКЦ = 6														
Отн. частота	2		3		4		5		7		11			
C, мкФ	32.0		44.8		48.0		56.0		28.0		16.0			
L, мГн	82.0		25.1		13.2		7.2		7.2		7.4			
QI	80		70		50		50		50		30			
QF	100		100		100		100		100		100			
RД, Ом	4700		2700								80			
Параметры цикла расчета, о.с.						Начало = 1.00		Шаг = 0.05		Число шагов = 2501				
Результаты расчета														
Генерируемая ФКЦ реактивная мощность при f = 50 Гц и U = 35 кВ, Мвар											95.4			
Действующее напряжение на шинах нагрузки, кВ											35.002			
Коэффициент несинусоидальности на шинах В.Н., %											0.73			
Коэффициент несинусоидальности на шинах Н.Н., %											1.12			
Гармоника настройки ФКЦ						2	3	4	5	7	11			
Реактивная мощность ФКЦ, Мвар						16.6	19.4	19.7	22.4	11.0	6.2			
Действующий ток 1-й гармоники, А						274	320	325	370	181	103			
Действующий ток гармоники настройки, А						62	129	38	146	71	17			
Полный ток, А						281	345	327	398	195	104			
Действующее напряжение на КБ, кВ						27.4	22.9	21.6	21.1	20.7	20.4			

Следующий шаг — проектирование конденсаторных батарей (КБ) ФКЦ, представляющих собой несколько последовательно соединенных блоков конденсаторов, состоящих из ряда параллельно соединенных силовых конденсаторов, и расчет индуктивностей фильтровых реакторов (РФ). Эти расчеты выполняет программа "ФКЦ", которая для заданного типа силового конденсатора (т.е. для заданных значений его номинальной мощности и напряжения), заданного количества последовательных и параллельных конденсаторов в батарее и требуемой частоты настройки ФКЦ вычисляет следующие параметры: емкость КБ и индуктивность РФ, установленную мощность КБ и генерируемую на частоте сети реактивную мощность ФКЦ, номинальное и рабочее напряжения КБ, токи включения и токи 2- и 3-фазных КЗ ФКЦ. Вариантные расчеты позволяют в результате выбрать такие параметры КБ, при которых реальные воздействия по току и напряжению, рассчитанные ранее по программе "Спектр_М", не превышают значений, допустимых по ТУ на конденсаторы. Кроме того, на основе полученных данных можно сформулировать технические требования к фильтровым реакторам. Пример файла результатов программы "ФКЦ" приведен ниже.

ПРОГРАММА ФКЦ				
Исходные данные		Вариант БМК35-05		
Линейное напряжение СТК, кВ	35			
Мощность КЗ шин, МВА	458			
Напряжение конденсатора, кВ	6,3			
Мощность конденсатора, квар	200			
Относительная частота настройки ФКЦ	1,96	3,0	4,0	5,0
Число последовательных конденсаторов	6	5	4	4
Число параллельных конденсаторов	12	14	12	14
Результаты расчета				
Емкость КБ, мкФ	32	44,8	48	56
Индуктивность РФ, мГн	82,2	25,1	13,3	7,2
Номинальный ток частоты сети, А	303	353	358	408
Генерируемая реактивная мощность, Мвар	16,7	19,4	19,8	22,5
Установленная реактивная мощность, Мвар	43,2	42,0	28,8	33,6
Отношение Q_r / Q_c	2,59	2,16	1,46	1,49
Номинальное напряжение КБ, кВ	37,8	31,5	25,2	25,2
Рабочее напряжение КБ, кВ	30,1	25,0	23,7	23,2
Номинальный ток КБ, А	381	444	381	444
Максимально допустимый ток КБ, А	545	635	545	635
Амплитуда тока включения, кА	1,02	1,66	2,01	2,49
Ток двухфазного КЗ, кА	0,49	0,91	1,3	1,89
Ток трехфазного КЗ, кА	0,56	1,21	1,73	2,52
Суммарная генерируемая мощность ФКЦ - 78,4 Мвар				
Суммарная установленная мощность КБ - 147,6 Мвар				

Для эффективной работы ФКЦ необходимо обеспечить разброс между значениями емкости КБ трех фаз в пределах 1—2% от номинального значения. Силовые конденсаторы выпускаются с разбросом емкости $\pm 10\%$, блоки конденсаторов имеют разброс емкости $\pm 5\%$. Программа "ДистрБК", исходя из реальных значений емкостей КБ, предназначенных для комплектации трех фаз КБ одной ФКЦ, обеспечивает такое распределение БК по фазам КБ, при котором результирующий разброс емкости КБ по фазам не превышает $\pm 0,5\%$ для 4 последовательных рядов конденсаторов, $\pm 0,2\%$ — для 5 рядов и $\pm 0,1\%$ — для 6 рядов.

Рассмотренный выше комплекс программ был использован во всех проектах СТК, выполненных в Отделении высоковольтной преобразовательной техники ВЭИ им. В.И.Ленина, а затем в АО "Ансальдо-ВЭИ" в течение последних 18 лет. Результаты испытаний и эксплуатации этих СТК на месте установки подтвердили правильность заложенных в программах принципов и алгоритмов.

Список литературы

1. Seki A., Nishidai J. Thyristor-controlled var compensator system for the reduction of arc picker // 8-й Междунар. конгресс по электротермии. — Льеж, 1978. — Секция 5а, докл. 8.
2. Чуприков В.С., Ольшванг М.В. Выбор мощности статического тиристорного компенсатора для предприятий с ДСП // Тезисы докл. I Всесоюз. научно-техн. симпозиума "Электрооборудование и электрооборудование дуговых печей", Тбилиси, 16-18 ноября 1988 г. — М.: Информэлектро, 1988. — С. 56—57.
3. Ольшванг М.В., Рычков Е.В., Аганишвили К.Е., Чуприков В.С. Фильтрокомпенсирующие цепи статических компенсаторов // Электричество. — 1990. — № 1. — С. 23—29.