

УДК 621.313.323.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТИРИСТОРНЫХ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ С ОГРАНИЧЕННЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

АБДУЛКАДЫРОВ А.И., ГУЛИЕВ С.Ф.

Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия

Рассматриваются коммутационные процессы в тиристорных пусковых устройствах (ТПУ), использующих штатное оборудование тиристорной системы возбуждения синхронных машин. Установлено, что наилучшие коммутационные параметры получаются в ТПУ, подключенном к отпайке обмотки статора: существенно уменьшается угол коммутации инвертора, вследствие чего первая гармоническая тока статора, коэффициент мощности и электромагнитный момент возрастают, обеспечивается режим с максимальной надежностью инвертирования.

С ростом единичной мощности синхронных машин (СМ) их пуск становится сложной технической задачей. В ряде случаев традиционные способы пуска оказываются неприемлемыми, поэтому частотный способ пуска синхронных машин от тиристорных преобразователей частоты (ПЧ) находят все большее применение. Между тем, этот способ дороже и сложнее, особенно в случае индивидуального применения.

Были предприняты попытки разработать тиристорные пусковые устройства, приемлемые и с экономической точки зрения. В основном по этой причине практически все ТПУ выполняются с ограниченным выходным напряжением, в ряде случаев значительно меньшим, чем номинальное напряжение СМ. К последним относятся схемы ТПУ, использующие штатное оборудование тиристорной системы возбуждения [1, 2]

Структурная схема одного из вариантов таких ТПУ приведена на рис.1. Она построена на базе реверсивной системы возбуждения с тиристорными выпрямителями 6 и 7 положительного и отрицательного возбуждения синхронной машины. При пуске указанные выпрямители совместно с уравнивающим реактором 8 образуют ПЧ, выход которого подсоединяется к обмотке статора 7 или к отпайке 19 этой обмотки.

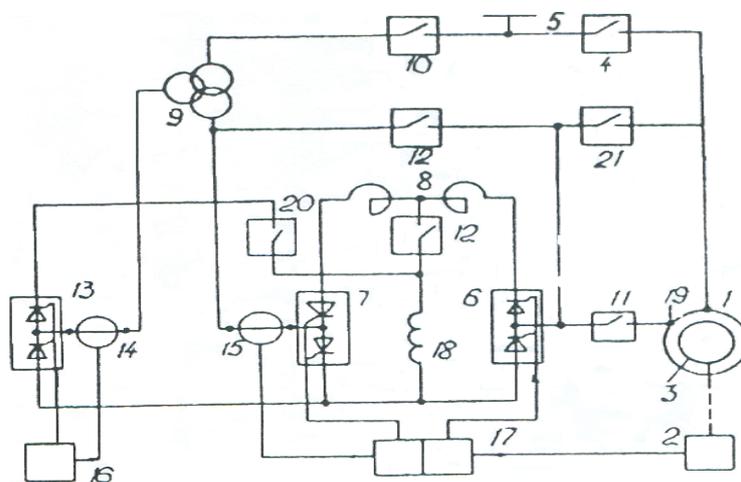


Рис. 1. Структурная схема тиристорного пускового устройства синхронной машины.

Особенность этих схем такова, что на начальном этапе пуска синхронной машины выход ТПУ подключается к обмотке статора непосредственно. Это дает возможность значительно увеличить электромагнитный момент СМ (поэтому такой пуск назван прямым) и успешно преодолеть момент трогания на валу СМ.

При термически допустимых токах в обмотке СМ и тиристорного оборудования штатной системы возбуждения возможные значения начального электромагнитного момента, создаваемого с помощью рассматриваемых ТПУ, находятся на уровне 0,075-0,200 отн. ед. По имеющимся сведениям, например [3], начальный момент сопротивления (момент трогания) для синхронных компенсаторов и турбогенераторов не превышает 0,05 отн. ед.

По мере разгона ЭДС машины возрастает, и при некотором ее значении, большем допустимого для ТПУ, между обмоткой статора и выходом ТПУ включается согласующий трансформатор или выход ТПУ переключается к отпайке обмотки статора, как на рис.1. Это приводит к существенному уменьшению электромагнитного момента СМ. В первом случае, кроме того, требуется применение трансформатора, удовлетворяющего достаточно высоким требованиям к частотному диапазону его работы.

В связи с этим, исследование коммутационных процессов в ТПУ после указанного переключения приобретает важное значение для ответа на вопрос о возможности дальнейшего разгона машины.

Особенности искусственной коммутации инвертора разработанных ТПУ рассмотрены в [4].

Целью данной статьи является определение области и параметров естественной коммутации инвертора рассматриваемых ТПУ.

Здесь возможны следующие варианты расчета* :

- 1)инвертор-обмотка статора;
- 2)инвертор-отпайка обмотки статора;
- 3)инвертор-трансформатор-обмотка статора;
- 4)инвертор-обмотка статора при наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) на поддержание напряжения обмотки статора, максимально допустимого для ТПУ.

Вариант «инвертор-обмотка статора».

Воспользуемся известным соотношением между углом опережения β , углом коммутации γ , постоянным током I_d на входе инвертора и действующим значением фазной ЭДС E обмотки статора [5]:

$$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{2X_k I_d}{\sqrt{6}E} = I_d / I_k \quad (1)$$

где X_k –индуктивное сопротивление коммутируемого контура на фазу; I_k - амплитудное значение тока через два тиристора и цепь короткого замыкания между двумя фазными отмотками статора.

Сопротивление X_k без особой погрешности можно принять равным индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора $X_k \approx X_\sigma$.

Из анализа процесса коммутации инвертора следует, что ее ограничение наступает тогда, когда угол коммутации γ возрастает до величины угла опережения β , если считать, что время отключения тиристора пренебрежимо мало. Это допущение для сопоставительных расчетов приемлемо, поэтому максимальное значение тока I_d можно определить по упрощенному выражению

$$I_{d \max} = (1 - \cos \beta) I_k \quad (2)$$

*расчеты ведутся для синхронного компенсатора типа СКП-320 с параметрами по [4].

В выражении (1) влияние активного сопротивления контура не учитывается. Однако при весьма низких частотах вращения индуктивное сопротивление X_k становится соизмеримым с активным сопротивлением обмотки статора R . В этом случае ток короткого замыкания I_k , если обозначить относительную частоту вращения $n/n_H = n_*$, и с учетом того, что при токе возбуждения $I_f = I_{fxx} = const$ $E = U_H n_*$, определяется по формуле:

$$I_k = \frac{\sqrt{6}U_H n_*}{2\sqrt{R^2 + (X_k n_*)^2}} = \frac{I_{KH}}{\sqrt{\left(\frac{R/X_k}{n_*}\right)^2 + 1}} \quad (3)$$

где $I_{KH} = \sqrt{6}U_H / 2X_k$ - ток короткого замыкания, рассчитанный при номинальной частоте n_H и токе возбуждения холостого хода I_{fxx} СМ.

Вариант: «инвертор-отпайка обмотки статора».

В данном случае максимальное значение тока на входе инвертора определяется выражениями (2) и (3) с учетом отличия в параметрах коммутируемого контура $X_{k0} = K_0^2 X_k$ и $R_0 = K_0 R$, где $K_0 = U_0 / U_H$ - коэффициент отпайки, U_0 - допустимое для ТПУ напряжение, а именно:

$$I_{d \max 0} = \frac{(1 - \cos \beta_0) I_{KH}}{\sqrt{\left(\frac{R/X_k}{n_*}\right)^2 + K_0^2}} \quad (4)$$

Из выражений (2)÷(4), приняв $\beta = \beta_0$ и обозначив $R/X_k = \rho$, получаем:

$$I_{d \max 0} / I_{d \max} = \sqrt{\frac{n_*^2 + \rho^2}{K_0^2 n_*^2 + \rho^2}} \quad (5)$$

Предельные значения этого выражения:

- а) при $n_* \rightarrow 0$ $I_{d \max 0} / I_{d \max} = 1$
- б) при $n_* \rightarrow 1$ $I_{d \max 0} / I_{d \max} = 1/K_0$.

Поскольку для режимов естественной коммутации инвертора имеет смысл диапазон частот $0,05 - 0,1 \leq n_* < 1$, то однозначно можно утверждать о более благоприятных условиях коммутации инвертора в варианте «инвертор-отпайка обмотки статора». Сказанное можно также усмотреть из таблицы 1, где приведены результаты расчетов коммутационных параметров для рассмотренных выше вариантов при $I_d = 3300A$. При заданном токе на входе инвертора I_d в данном варианте, по сравнению с другими, существенно уменьшается угол коммутации γ , что позволяет выставить сравнительно меньший угол опережения β , вследствие чего первая гармоническая тока статора, коэффициент мощности и электромагнитный момент возрастают.

Действительно, в варианте с отпайкой при $\beta = 15$ эл.гр естественная коммутация инвертора становится возможной уже при частоте вращения $n_* \geq 0,015$ отн.ед. В то же время для первого варианта почти аналогичные результаты достигаются только при $\beta = 30$ эл.гр

Таблица 1

№ варианта	Параметр	ед. изм.	Угол опережения инвертора β , эл. гр.											
			$\beta=15$						$\beta=30$					
			Относительная частота вращения, n^* , отн.ед.											
			0,01	0,015	0,05	0,1	0,5	1,0	0,01	0,015	0,05	0,1	0,5	1,0
1	I_{dmax}	А	1815		2233	2251	2257	2257	7152		8800	8873	8896	8896
	γ	эл.гр	-		-	-	-	-	8.1		6.4	6.3	6.3	6.3
	δ	эл.гр	-		-	-	-	-	21.9		23.6	22.7	22.7	22.7
2	I_{dmax}	А	3046	9192	14471	25279	43412	44666	12007	36225	57031	99630	171025	176037
	γ	эл.гр	-	3.0	2.0	1.0	0.6	0.5	4.5	1.5	1.0	0.5	0.30	0.29
	δ	эл.гр	-	12	13	14	14.4	14.5	25.5	28.5	29	29.5	29.7	29.71

Таблица 2

№ варианта	Параметр	ед. изм.	Угол опережения инвертора β , эл. гр.											
			$\beta=30$						$\beta=45$					
			Относительная частота вращения, n^* , отн.ед.											
			0,01	0,05	0,10	0,13	0,5	1,0	0,01	0,015	0,1	0,25	0,5	1,0
3	I_{dmax}	А	4210	5075	5121	5121	5121	5121	9206	11097	11197	11197	11197	11197
	γ	эл.гр	16.2	12.4	12.2	12.2	12.2	12.2	9.3	9.3	7.5	7.5	7.5	7.5
	δ	эл.гр	13.8	17.6	17.8	17.8	17.8	17.8	35.7	37.4	37.5	37.5	37.5	37.5
4	I_{dmax}	А	-	8800	4437	3422	890	445	-	19242	9701	3891	1945	973
	γ	эл.гр	-	6.4	15	24.3	-	-	-	4.2	8.8	28	-	-
	δ	эл.гр	-	23.6	15	5.7	-	-	-	40.8	36.2	17	-	-

Вариант: «инвертор-трансформатор-обмотка статора».

Как было указано выше, при частоте вращения $n^*=0,05$ отн.ед. между выходом ТПУ и обмоткой статора включается согласующий трансформатор, либо выход ТПУ переключается к отпайке обмотки статора. В обоих случаях электромагнитный момент уменьшается в $1/K_o$ раз (при прочих одинаковых параметрах). В варианте с отпайкой это связано с уменьшением количества эффективных проводников обмотки статора, обтекаемых током, в $1/K_o$ раз, а в случае с трансформатором во столько же раз уменьшается действующее значение тока статора.

При наличии между обмоткой статора и инвертором трансформатора индуктивное и активное сопротивления коммутируемого контура на фазу будут определяться как:

$$X_{кТ} = X_T + K_o^2 X_\sigma; \quad R_{кТ} = R_T + K_o^2 R,$$

где X_T и R_T -сопротивления трансформатора; все параметры приведены к стороне инвертора.

Максимальное значение тока на входе инвертора:

$$I_{d \max T} = \frac{\sqrt{6}(1 - \cos \beta) K_o U_H}{\sqrt{\left(\frac{R_{кТ}}{n^*}\right)^2 + X_{кТ}^2}} \quad (6)$$

Отметим, что расчеты для всех вариантов выполнены при следующих данных: $U_H=11547$ В; $U_0=577$ В; $K_0=0,05$; $I_d=3300$ А; $X_\sigma=0,231$ Ом; $R=0,0016$ Ом; $X_T=0,018$ Ом; $R_T=0,018$ Ом. Результаты расчета для данного варианта приведены в табл. 2 (вариант 3). Как и в первом варианте здесь коммутация становится возможной только при $\beta \geq 30$ эл.гр, однако углы коммутации больше. Это, естественно, приведет к уменьшению действующего значения тока статора (сравнение ведется внутри диапазона $n^*=0,01 \dots 0,05$ отн.ед.). Данный вариант заметно уступает варианту с отпайкой, в котором коммутация инвертора оказывается возможной при $\beta=15$ эл.гр.

Вариант: «инвертор-обмотка статора + АРВ».

Этот вариант схемы пуска рассматривается как возможный в комбинации с первым вариантом для реализации частотного пуска по этому варианту при $n^* > 0,05$ отн.ед. Наличие АРВ позволяет поддерживать напряжение на выводах обмотки статора на уровне $K_0 U_H$, допустимом для ТПУ.

С учетом этого

$$I_{d \max}^{APB} = \frac{\sqrt{6}(1 - \cos \beta) K_0 U_H}{2\sqrt{R^2 + (X_k n^*)^2}} = \frac{(1 - \cos \beta) K_0 I_{kH}}{2\sqrt{\left(\frac{R}{X_k}\right)^2 + n_*^2}} \quad (7)$$

Результаты расчета для этого варианта приведены в табл.2 (вариант 4). Они показывают, что АРВ позволяет осуществлять пуск по первому варианту при $\beta=30$ эл.гр до частоты вращения $n^* \geq 0,13$ отн.ед. АРВ включается при $n^*=0,05$ отн.ед., а при $n^*=0,13$ отн.ед. его уставка изменяется в соответствии с изменением режима пуска (переход на второй, либо третий вариант). Если увеличить угол опережения инвертора с $\beta=30$ эл.гр. до $\beta=45$ эл.гр., то, благодаря АРВ, такой пуск можно допустить до частоты вращения $n^*=0,25$ отн.ед. Данный алгоритм позволяет увеличить средние значения электромагнитного момента в указанных диапазонах частоты вращения.

Приближенные расчеты показывают, что при $\beta=45$ эл.гр. среднее значение момента получается в 1,35 раз больше, чем при $\beta=30$ эл.гр., а по сравнению с вариантом с отпайкой увеличение момента составляет 4,5 раз.

На основании полученных результатов и их сопоставительного анализа предлагается следующая стратегия пуска: после окончания искусственной коммутации инвертора в самом начале пуска реализуется вариант 1, а затем, при достижении напряжения на выводах статора допустимой величины U_0 , в работу включается АРВ, поддерживающее это значение постоянным до достижения частоты вращения $n^*=0,25$ отн.ед. Далее в схеме ТПУ осуществляется переключение: либо выход ТПУ подключается к отпайке обмотки статора, либо же между выходом ТПУ и обмоткой статора включается согласующий трансформатор. Последний вариант рекомендуется использовать в действующих установках, а вариант с отпайкой, как более предпочтительный, рекомендуется для перспективного применения.

Заключение

1. На основании выполненных расчетов коммутационных процессов в ТПУ, использующих штатное оборудование тиристорной системы возбуждения СМ, установлено, что наилучшие коммутационные параметры реализуются в ТПУ, подключенном к отпайке обмотки статора: здесь сравнительно меньший угол коммутации инвертора позволяет выставить соответственно меньший угол опережения инвертора, в результате чего первая гармоническая тока, коэффициент мощности и электромагнитный момент возрастают.

2. Установлено, что путем использования АРВ СМ удается реализовать частотный пуск по схеме «инвертор-обмотка» на большом диапазоне частоты вращения, что позволяет увеличить среднее значение электромагнитного момента.

-
1. *Абдулкадыров А.И. и др.* А.С. №1660123, СССР //Б.И. 1991, №24
 2. *Абдулкадыров А.И. и др.* А.С. №1686674, СССР //Б.И. 1991, №39
 3. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. – с. 229.
 4. *Абдулкадыров А.И.* Частотный пуск синхронной машины с применением тиристорной системы возбуждения // *Электротехника.*-1998.-№6.
 5. *Бут Д.А.* Бесконтактные электрические машины. М: Высш.шк., 1990.-с.225

MƏHDUD ÇIXIŞ GƏRGİNLİKLİ TİRİSTORLU İŞƏSALMA QURĞULARINDA KOMMUTASIYA PROSESLƏRİNİN TƏDQIQI

ABDULKADIROV A.İ., QULIYEV S.F.

Tiristorlu təsirlənmə sisteminin daxili avadanlıqlarının tətbiqi ilə tiristor işəsalma qurğularının nəzəriyyəsi hazırlanmışdır. Bu nəzəriyyə sinxron maşının işəsalma proseslərinin və parametrlərinin analitik hesablama metodlarını özündə əks etdirir. Tiristor işəsalma qurğularının müxtəlif variantlarına baxılmışdır. Onların əsas xarakteri ondan ibarətdir ki, orada məhdudlaşdırılmış çıxış gərginliyi, sinxron maşınların nominal gərginliyindən çox kiçikdir.

RESEARCH OF COMMUTATION PROCESS IN THYRISTOR STARTING DEVICE OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH LIMITED OUTPUT VOLTAGE

ABDULKADIROV A.I., QULIYEV S.F.

The theory of thyristor starting device was developed, including analytical method of calculation of the starting process and starting parameters of synchronous machine with application its thyristor excitation system. The diverse variants of thyristor starting device, which differ between themselves, have been developed.