



Вопрос продольной компенсации при помощи вращающихся машин наиболее полно разрешен советскими учёными—Л. В. Цукерник, И. С. Брук, Г. Е. Пухов и др.

Асинхронный генератор, предложенный И. С. Бруком в 1936 году, позволяет автоматически регулировать фазу э.д.с. компенсатора, при изменении фазы тока в линии без применения каких-либо регулирующих устройств (например, поворотный статор в схеме Моргана).

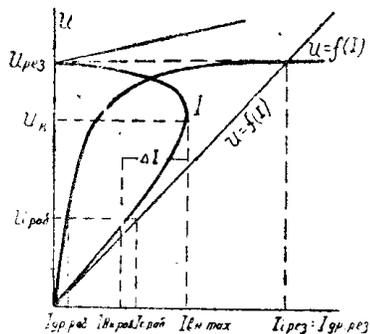
Схема Г. Е. Пухова является дальнейшей разработкой схемы И. С. Брука, где асинхронный мотор заменен синхронным.

Расчёты показали, что необходимая мощность вращающихся машин в условиях дальней передачи составляет  $(1,8 \div 2,5) P$ , где  $P$ — величина передаваемой активной мощности.

Следует указать, что все схемы продольной компенсации при помощи вращающихся машин обладают существенным недостатком: необходимо включение последовательных трансформаторов, мощность которых значительно превосходит передаваемую мощность по линии, что несомненно должно сказаться на стоимости передачи электроэнергии.

Статические конденсаторы являются на первый взгляд наиболее естественным и целесообразным средством продольной компенсации индуктивности линий. Применение их устраняет необходимость в сложных регулирующих устройствах, но на этом пути имеются значительные трудности. При коротких замыканиях на линии неизбежно повышение напряжения на обкладках конденсаторов. Для предохранения их от пробоев и уменьшения токов короткого замыкания все конденсаторные установки снабжены устройствами, тем или иным путём шунтирующими конденсаторы в момент появления недопустимых напряжений. Необходимость шунтирования конденсаторов при протекании через них токов короткого замыкания является отрицательным моментом этого устройства, так как линия декомпенсируется как раз в момент, когда с точки зрения устойчивости параллельной работы компенсация особенно необходима. Другим существенным недостатком схемы с применением статических конденсаторов с обычной защитой является то, что из-за уменьшения индуктивности линии токи короткого замыкания увеличиваются до совершенно недопустимых величин. Проблема отключения таких токов становится наиболее острой.

Автором разработана схема продольной компенсации статическими конденсаторами с одновременным ограничением токов короткого замыкания.



Фиг. 1

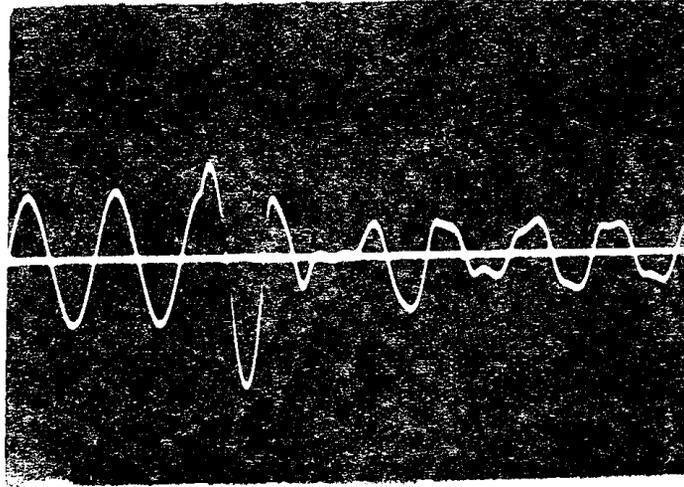
Как известно, вывод из работы конденсаторов на время короткого замыкания является необходимым. Известно также, что весьма быстрое отключение к. з. явилось средством решительного улучшения динамической устойчивости электрических систем. Только это средство позволяет поставить вопрос о сохранности динамической устойчивости при трёхполюсных коротких замыканиях. Поэтому вместе с выводом конденсаторов из работы жёлательно заставить их участвовать в обеспечении динамической устойчивости системы. Этого можно достичь, если конденсатор шунтировать не

разрядником, как это имеет место в настоящее время, а нелинейным индуктивным сопротивлением.

Соответствующим подбором вольтамперных характеристик ограничивающего устройства, т. е. дросселя насыщения и конденсатора (фиг. 1), можно получить следующие режимы работы.

1. При нормальном режиме ток нагрузки будет протекать через конденсатор и будет осуществляться продольная компенсация. Напряжение и ток в этом случае для устройства будут рабочими— $U_{раб}$  и  $I_{вн. раб}$ .

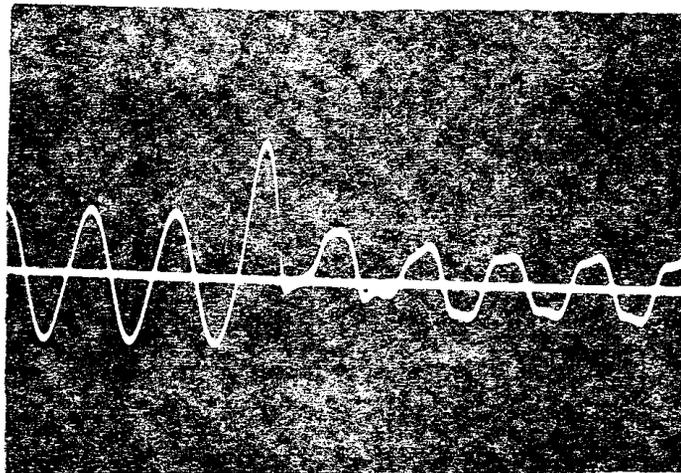
2. При коротком замыкании напряжение на конденсаторе начинает резко возрастать. С ростом напряжения ток намагничивания дросселя увеличивается. Вследствие этого проводимость контура сокращается и вызы-



Фиг. 2

вается ещё более быстрое увеличение напряжения на зажимах контура до напряжения резонанса  $U_{рез}$ .

Процесс втягивания в резонансные условия ограничивающего устройства происходит настолько быстро, что практически можно считать, что дополнительное сопротивление в поврежденную фазу вводится мгновенно.

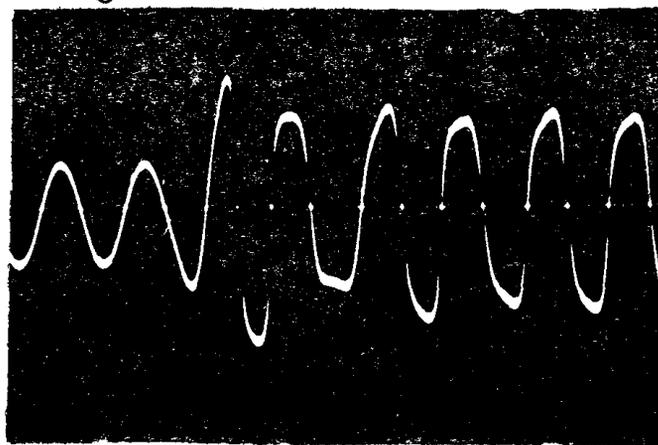


Фиг. 3

Ток во внешней цепи будет изменяться по кривой I фиг. 1. При наступлении короткого замыкания этот ток увеличится с  $I_{вн. раб}$  до  $I_{вн. макс}$ , а затем сократится до величины, меньшей номинального тока. Полностью ток запереть невозможно из-за наличия активных сопротивлений дросселя и конденсатора и гистерезиса, даже если напряжение резонанса равно или больше фазового напряжения. При соблюдении последнего условия величина броска тока  $\Delta I$  во внешней цепи при наступлении короткого замыкания практически не зависит от момента наступления короткого замыка-

ния и величина пика тока не превзойдет  $(1,5 \div 2)$  — кратной величины номинального рабочего тока.

Картину переходного процесса при наличии ограничивающего устройства отражают осциллограммы, изображённые на фиг. 2 и 3. Короткое замыкание в одном случае наступило в момент прохождения тока нагрузки через максимум (фиг. 2), а во втором — через минимум (фиг. 3). Из осциллограмм видно, что изменение тока во внешней цепи мало зависит от момента возникновения аварии и определяется в основном вольтамперными характеристиками дросселя и конденсатора. Напряжение на конденсаторе при переходном процессе незначительно превосходит напряжение резонанса тока ограничивающего устройства. Это получается вследствие того, что проводимость дросселя при больших насыщениях очень сильно



Фиг. 4

изменяется при незначительном изменении напряжения. Увеличивая свою проводимость, дроссель шунтирует конденсатор, не давая сколько-нибудь значительно превзойти напряжение резонанса, как это видно из осциллограммы, приведённой на фиг. 4.

Величина установленной мощности конденсаторов в нормальном режиме определяется степенью компенсации. О величине последней в зависимости от работы напряжения конденсатора, выраженного в долях от фазового напряжения линии, можно судить по табл. 1, где подсчитано ёмкостное сопротивление в относительных единицах. За базисные величины приняты номинальное напряжение линии передачи и передаваемая по этой цепи номинальная мощность.

Таблица 1

$U_c : kU_{\phi}$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
$X_{*c}$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
$X_{*dp}$	10	5	2,5	1,67	1,25	1	0,835

Необходимая мощность насыщения  $Q_{dp}$  в аварийном режиме должна быть равна мощности конденсатора в этом же режиме.

Величина её в зависимости от степени компенсации приведена в табл. 1 в долях от передаваемой мощности.

Мощность дросселя заметно снижается с увеличением рабочего напряжения конденсатора. Стоимость дросселя насыщения еще намного уде-

шевляется, если учесть то обстоятельство, что резонансный режим его длительно продолжаться не будет. При нормальном же режиме по обмотке дросселя должен протекать незначительный ток, который практически обмотки нагревать не будет. Поэтому можно допустить кратковременную значительную перегрузку обмотки дросселя, допустив при этом плотность тока в 10—20 раз больше, чем для обычного трансформатора. Из сказанного следует, что при определении стоимости устройства решающим является стоимость конденсаторов.

Как уже указывалось, во время коротких замыканий ограничивающее устройство входит в резонансные условия, вводя тем самым практически мгновенно дополнительные сопротивления в поврежденной фазы. Хотя это сопротивление изменяется по нелинейному закону в функции от приложенного напряжения, будем считать его постоянным и равным величине  $Z_{доб}$ .

При определении предела передаваемой мощности в аварийном режиме в зависимости от вида короткого замыкания в схему замещения прямой последовательности вводится шунтирующее сопротивление  $X_k$ , состоящее из сочетаний сопротивлений обратной и нулевой последовательностей по отношению места короткого замыкания. В отличие от обычных схем компенсации в данном случае величина  $X_k$  должна определяться с учетом добавочного сопротивления. В настоящее время принято расчёт динамической устойчивости вести в предположении постоянства переходной э.д.с.  $E_d'$  за переходным реактансом  $X_d'$ . В случае практически мгновенного ограничения токов короткого замыкания такое предположение получается неоправданным и допускает заведомо излишние запасы. Практика показывает, что некоторые системы работают устойчиво, в то время как по расчётам они должны „развалиться“ даже при наличии обычного оборудования. На это обстоятельство указывалось уже техническим отделом МЭС. В нашем случае расчёт динамической устойчивости следует вести при условии постоянства сверхпереходной э.д.с.  $E_d''$  за сверхпереходным реактансом  $X_d''$ . Это подтверждается также и проведёнными расчётами изменения  $E_d''$  во времени до 0,03 сек, где  $E_d''$  при наличии автоматического регулятора напряжения практически остаётся постоянной.

С учётом сказанного передаваемая мощность при коротком замыкании будет равна

$$P = \frac{E_d'' \cdot U}{\frac{X_I \cdot X_{II}}{X_k} + X_{сум}} \sin \delta, \quad (2)$$

где  $X_I$  — сопротивление системы до места короткого замыкания от генераторной станции;

$X_{II}$  — сопротивление системы до места короткого замыкания от приёмного конца.

Амплитуда синусоиды (2) меньше, чем для выражения (1), так как в знаменателе появляется дополнительный член  $\frac{X_I \cdot X_{II}}{X_k}$ . Шунтирующее со-

противление  $X_k$  в данном случае будет сильно увеличено и в пределе, когда запаривание тока в повреждённой фазе контуром будет полное,  $X_k$  будет равен бесконечности, что эквивалентно отключению короткого замыкания.

Таким образом, действие ограничивающего устройства по отношению динамической устойчивости можно уподобить пофазному мгновенному отключению повреждения. В реальных условиях нагрузочно-угловая характеристика будет приближаться к характеристике, когда повреждение отключено, т. е. предел по динамической устойчивости подходит вплотную к пределу по статической устойчивости.

Подводя итоги, можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Продольная компенсация статическими конденсаторами в сочетании с расщеплением проводов фазы значительно улучшает статическую устойчивость.

2. Шунтирование конденсатора дросселем насыщения весьма сильно улучшает динамическую устойчивость. Действие ограничивающего устройства эквивалентно пофазному отключению нормально работающей линии.

3. Благодаря быстрому отключению токов короткого замыкания динамическая устойчивость определяется сверхпереходной э.д.с. генератора  $E_d''$ .

4. Проблема разрывной мощности, термической и динамической устойчивости оборудования упрощается.

5. Стоимость ограничивающего устройства снижается за счёт значительной кратковременной перегрузки контура на время аварии.

6. Наличие ограничивающих устройств позволяет решительно пойти по пути пофазного управления.

7. При связанных схемах передачи для обеспечения динамической устойчивости сокращается необходимое число переключательных пунктов, что может дать большую экономию в капиталовложениях.

8. Появляется возможность сосредоточения всех конденсаторов в одно или два места, так как увеличения токов короткого замыкания не будет.

9. Введением активного сопротивления в цепь дросселя в ограничивающем контуре появляется возможность скомпенсировать некоторую долю сбрасываемой активной нагрузки при коротком замыкании, что приведёт также к улучшению динамической устойчивости.

Ограничивающее устройство прошло успешные лабораторные испытания. Ближайшей задачей является практическое испытание данного предложения в реальных условиях.