

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Ю. В. СЕНЯГИН

РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В УЗЛАХ  
НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Диссертация написана на русском языке

(Специальность 05.275 - "Электрические сети и системы")

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 1972

Работа выполнена в лаборатории энергосистем Белорусского филиала энергетического научно-исследовательского института им. Г.М.Кржижановского.

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
В.И.НОВАШ

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор  
Г.Е.ПОСПЕЛОВ  
кандидат технических наук  
В.А.ФАЙБИСОВИЧ

Ведущее предприятие -  
Белорусское отделение "Энергосеть-  
проект".

Автореферат разослан "22" февраля 1972 г.

Защита состоится "31" марта 1972 г. на заседа-  
нии Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим  
специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Зна-  
мени политехническом институте.

Заверенный и скрепленный печатью отзыв на автореферат в  
2 экземплярах просим направлять по адресу: г.Минск-27, Ленин-  
ский проспект, 65, Белорусский политехнический институт. Учено-  
му секретарю Совета.

О дне защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА -  
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,  
ДОЦЕНТ

Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ

## В В Е Д Е Н И Е

Решениями XXIV съезда КПСС предусматривается дальнейшее увеличение объема производства электрической энергии и рост энерговооруженности народного хозяйства.

Развитие и объединение энергосистем вместе со всевозрастающей ролью электроэнергетики в жизни страны повышают требования к надежности работы энергосистем. Особую актуальность приобретают вопросы предотвращения аварий и обеспечения устойчивости работы энергосистем в установившихся и переходных режимах, поскольку нарушение устойчивости параллельной работы в электрических системах влечет за собой расстройство электроснабжения крупных промышленных районов и городов.

В общем комплексе мероприятий по обеспечению надежности работы энергосистем большая роль принадлежит противоаварийной автоматике и, в частности, автоматике повышения устойчивости параллельной работы электростанций и устойчивости нагрузки.

В развитии и внедрении такой автоматики советские энергетики, благодаря работам А.А.ГОРЕВА, П.С.ЖДАТОВА, В.А.ВЕНИКОВА, Л.Г.МАМИКОНЯНЦА, И.М.МАРКОВИЧА, Е.Я.КАЗОВСКОГО, Д.П.ЛЕДЯНИКИНА, Н.И.СОКОЛОВА, С.А.СОВАЛОВА, Л.В.ЦУКЕРНИКА, А.А. ХАЧАТУРОВА, М.Г.ПОРТНОГО и др., достигли значительных успехов.

Дальнейшее совершенствование автоматики, обеспечивающей повышение надежности работы энергосистем, невозможно без продолжения исследований устойчивости и особенностей асинхронных режимов синхронных машин, значительного расширения круга подлежащих исследованию задач.

В современных крупных энергосистемах для обеспечения возможно большей стабильности и регулирования напряжения в отдельных узловых точках, к которым присоединены значительные

промышленные нагрузки, все шире применяются мощные синхронные компенсаторы (СК).

Как источники реактивной мощности в крупных удаленных узлах нагрузки, где суммарная мощность потребления значительно больше генерируемой мощности, мощные синхронные компенсаторы имеют существенные преимущества по сравнению со всеми другими средствами, применяющимися для этих целей. Появились новые типы синхронных компенсаторов с водородным охлаждением, новые способы их установки, значительно увеличилась мощность отдельных агрегатов. Так в нашей стране освоен выпуск компенсаторов с охлаждением водородом мощностью 50000 ква и 100000 ква, намечается выпуск компенсаторов типа КСВ мощностью 160000 ква.

Такая значительная величина мощности СК позволяет в заметной степени влиять на режим питающей сети и близлежащий узел нагрузки как в отношении потерь в сети, так и в отношении величины напряжения в узле нагрузки в нормальных установившихся режимах.

Одновременно с ростом числа установленных в энергосистемах мощных синхронных компенсаторов все большего внимания требуют вопросы обеспечения устойчивости их работы. Выпадение из синхронизма крупного синхронного компенсатора может привести к нарушению устойчивости электрически близкого узла нагрузки и возникновению асинхронного режима по отдельным связям энергосистемы, а в отдельных случаях и повреждению оборудования.

Настоящая работа посвящена исследованию поведения синхронных компенсаторов при различных режимах работы электрической системы, их влиянию на режим узлов нагрузки, изучению особенностей и параметров асинхронного режима синхронных компенсаторов, выявлению возможности и эффективности быстрой ресинхронизации, разработке и исследованию средств для ее осуществления.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений.

## 1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Увеличение единичных мощностей синхронных компенсаторов, достигаемое за счет интенсификации охлаждения обмоток без существенного увеличения габаритов и веса машины, привело к возрастанию относительных значений реактивных сопротивлений, умень-

шению инерционных постоянных, и как следствие - к ухудшению устойчивости параллельной работы.

Поэтому практически важным является вопрос о поведении мощных синхронных компенсаторов в узлах нагрузки при аварийных ситуациях в энергосистеме. В практике отмечаются случаи выпадения СК из синхронизма и возникновения асинхронного режима, сопровождающегося повреждением оборудования.

Современные мощные СК с водородным охлаждением вследствие повышенной чувствительности к толчкам тока и асинхронным режимам практически не допускают асинхронных проворотов по условиям теплового режима и механической прочности и обычно отключаются при возникновении хотя бы кратковременных асинхронных режимов с возбуждением.

Повторный пуск СК даже при наличии средств автоматики требует длительного времени. Поэтому внезапная и длительная потеря источника реактивной мощности в узле нагрузки также сопряжена с угрозой нарушения устойчивости узла, приводящего к расстройству технологических процессов потребителей и большому экономическому ущербу.

Необходимость быстрого отключения выпавших из синхронизма компенсаторов, как общее правило, представляется далеко не очевидной. В некоторых случаях, возникающий после нарушения устойчивости асинхронный режим, является кратковременным и завершается непосредственной ресинхронизацией без принятия специальных мер. Кроме того, наличие целого ряда особенностей СК, определяют возможность ресинхронизации СК без его отключения от сети путем кратковременного снятия возбуждения.

Необходимость правильного решения указанных вопросов определяет актуальность проведения исследований особенностей и параметров асинхронного режима мощных компенсаторов, условий и режима ресинхронизации СК.

Обеспечение устойчивости узла нагрузки наряду с предотвращением асинхронных режимов СК с возбуждением может быть достигнуто лишь с помощью соответствующих средств противоаварийной автоматики, специально реагирующих на появление асинхронных режимов и дающих "команды" на осуществление тех или иных противоаварийных мероприятий.

Разработанные в настоящее время устройства выявления асинхронного режима имеют еще те или иные недостатки (малую для

некоторых случаев чувствительность, возможность ложной работы и т.п.), поэтому необходима дальнейшая работа по исследованию и усовершенствованию их.

В связи с этим в настоящей работе поставлены, исследованы и решены следующие вопросы:

исследование поведения СК при аварийных ситуациях в энергосистеме и анализ условий и режимов, приводящих к выпадению из синхронизма;

исследование асинхронного режима СК, характера изменения основных электрических параметров СК, возможной длительности и условий непосредственной самопроизвольной ресинхронизации компенсаторов;

исследование режима ресинхронизации СК путем кратковременного снятия возбуждения, обоснование допустимости и целесообразности ресинхронизации, поведение и устойчивость узлов нагрузки в этом режиме;

разработка и исследование устройства, выявляющего возникновение асинхронного режима СК и осуществляющего его автоматическую ресинхронизацию.

В качестве основного метода исследований использовался метод математического моделирования с реализацией математических моделей на АВМ и ЭЦВМ. Ряд вопросов практического характера был выявлен в результате испытаний, проведенных в одном из узлов нагрузки Белорусской энергосистемы.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

С целью оценки динамической устойчивости синхронных компенсаторов в узлах нагрузки и выявления режимов, приводящих к выпадению СК из синхронизма, проведено значительное количество расчетов динамической устойчивости СК, установленных в конкретной энергосистеме, при аварийных ситуациях.

Предложены алгоритмы и программа расчета динамической устойчивости энергосистемы на ЭЦВМ "Минск-22". Специфика данной программы заключается в том, что при расчетах устойчивости энергосистемы исследуемая явнополюсная синхронная машина представляется в алгоритме более подробно с учетом АРВ типа компаундирования и релейной форсировки возбуждения, что позволяет

оценить их влияние на характер исследуемого процесса. Программа позволяет производить расчеты относительного движения роторов генераторов электростанций и ряда параметров режима синхронного компенсатора в системе, содержащей до восьми эквивалентных генераторов.

Шесть генераторов представляются в эквивалентной схеме замещения неизменными э.д.с.  $E_i'$  за переходными сопротивлениями  $X_{di}'$ , один источник моделирует систему бесконечной мощности и представляется постоянным напряжением и частотой. Явнополюсная синхронная машина представляется переменной э.д.с.  $E_a$  за синхронным реактансом  $X_q$ . При определении этой переменной э.д.с. учитывается действие АРВ.

Электромагнитные моменты эквивалентных генераторов определялись через собственные и взаимные сопротивления системы с учетом влияния на собственные моменты регулирующего эффекта нагрузок по частоте и приближенным учетом асинхронных моментов. Учитывалось изменение моментов турбин под действием автоматических регуляторов скорости (АРС).

Для каждого из эквивалентных генераторов производится решение уравнения движения ротора и уравнения сервомотора АРС:

$$T_{ji} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_{Tot} - M_{Pl} - \frac{E_i^2 (1 + K_i S_i) \sin \delta_{ii}}{(1 + S_i) Z_{ii}} \quad (2-1)$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{E_i E_j}{Z_{ij}} \sin(\delta_{ij} - \delta_{ij}) - M_{Hi} \sum_{j=1}^n \left( \frac{E_j X_{di}'}{Z_{ij}} \right)^2 f(S_i - S_j);$$

$$T_{ci} \frac{dM_{Pi}}{dt} + M_{Pl} = \frac{S_i}{G_i} M_{Tni}, \quad (0 \leq M_{Tot} - M_{Pl} \leq M_{Tni}) \quad (2-2)$$

Характеристика удельного асинхронного момента, который полагается одинаковым для всех машин, приближенно задается в виде ломанной линии, состоящей из наклонного и горизонтального участков, определяемой выражениями:

$$\begin{cases} f(S_i - S_j) = K_{ac}(S_i - S_j) & \text{при } |S_i - S_j| \leq S_K \\ f(S_i - S_j) = \text{sign}(S_i - S_j) K_{ac} S_K & \text{при } |S_i - S_j| > S_K \end{cases}$$

Такое представление асинхронного момента дает вполне удовлетворительные результаты для турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительными обмотками.

Для явнополюсной синхронной машины решаются также уравнения переходного электромагнитного процесса в обмотке ротора и цепи обмотки возбуждения возбудителя:

$$T_{do} \frac{dE'_q}{dt} + E_q = E_{qeo} + E_{pe2} ; \quad (2-3)$$

$$T_b \frac{dE_{pe2}}{dt} + E_{pe2} = K_T I, \quad \text{при } U = K_{u1} \omega n \quad (2-4)$$

Расчетная э.д.с.  $E_q'$ , э.д.с.  $E_q$  за продольным синхронным реактансом  $X_d$  и составляющие тока и напряжения исследуемой машины определяются из следующих выражений:

$$E_a = \frac{z_{ii}}{z_{ii} - (X_q - X_d) \cos \alpha_{ii}} \left[ E'_q - (X_q - X_d) \sum_{j=1}^3 \frac{E_j}{z_{ji}} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) \right];$$

$$I_d = \frac{E_a \cos \alpha_{ii}}{z_{ii}} - \sum_{j=1}^3 \frac{E_j}{z_{ij}} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij});$$

$$I_q = \frac{E_a \sin \alpha_{ii}}{z_{ii}} - \sum_{j=1}^3 \frac{E_j}{z_{ij}} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij});$$

$$E_q = E_a + I_d (X_d - X_q);$$

$$I = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}; \quad U = \sqrt{(E_a - I_d X_q)^2 + (I_q X_q)^2}$$

Уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения возбудителя (2-4) решается при напряжении статора большем, чем напряжение срабатывания релейной форсировки возбуждения. При значительном снижении напряжения статора срабатывает релейная форсировка и напряжение возбудителя с этого момента возрастает

по линейному закону с заданной скоростью до потолочного значения

$$\begin{cases} E_{pс2} = E_{pс2}(t_k) + K_p(t - t_k) & \text{при } E_{qс0} + E_{pс2} \leq E_{пот} \\ E_{pс2} = E_{пот} - E_{qс0} & \text{при } E_{qс0} + E_{pс2} > E_{пот} \end{cases}$$

Обственные и взаимные сопротивления, а также параметры исходного режима эквивалентных генераторов (начальные значения величин и фаз в.д.с.) определялись экспериментальным путем на статической модели переменного тока, а также расчетами на ЭЦВМ по программам, разработанным в различных организациях.

Программирование описанной задачи было выполнено с применением автокода "Инженер" (АКИ-400).

Интегрирование системы дифференциальных уравнений производилось методом Рунге-Кутты с шагом 0,01 сек. и выдачей результатов счета через каждые 0,05 сек.

По данной программе были выполнены расчеты переходного режима синхронных компенсаторов, работающих в различных узлах нагрузки энергосистемы. Расчеты производились для случаев двухфазного К.З. на землю вблизи установки компенсаторов, работы АПВ линий при различных схемах основной системы.

На основании проведенных расчетов устойчивости было установлено, что возможны случаи выпадения СК из синхронизма.

Наиболее часто это происходит в узлах нагрузки с генерируемой мощностью, существенно меньшей мощности нагрузки, и получающих энергию от других станций по относительно слабым связям.

При возникновении на этих связях аварийных возмущений (к.з., ликвидируемое отключением линии) возникает значительный дефицит мощности в узле нагрузки и перераспределение потоков мощностей.

Напряжение в узле нагрузки претерпевает мгновенное (если пренебречь переходными процессами в элементах сети) изменение как по величине, так и по фазе. Эти изменения тем значительнее, чем больше потребляемая узлом нагрузки мощность и чем больше увеличивается реактанс связи с системой. Заметим, что в первый момент нарушения режима скорость вращения вектора в.д.с. СК, связанного с ротором и его инерционными свойствами, остается неизменной и, следовательно, сохраняется первоначаль-

ное его положение. Изменение величины и фазы вектора напряжения в узле нагрузки приводит к изменению электромагнитного момента СК. Нарушается баланс моментов на валу СК и под действием разности моментов ротор начинает тормозиться.

Синхронные компенсаторы в период торможения переходят в режим генераторов, не имеющих механического движущего момента турбины на валу, и воспринимают на себя часть близлежащей нагрузки, расходуя при этом механическую энергию вращающихся масс ротора, затухающую тем быстрее, чем большую мощность выдает потребителям СК.

За счет своих э.д.с. компенсаторы в первых циклах асинхронного хода поддерживают напряжение в части приемной системы на более высоком уровне; это приводит к увеличению мощности, забираемой потребителями, и потерь в сети; следствием является более глубокое торможение как самих СК, так и работающих параллельно с ними синхронных генераторов (относительно небольшой мощности).

В дальнейшем, вращаясь несинхронно, возбужденные СК попеременно становятся то источниками активной и реактивной мощности, то ее потребителями, что приводит к беганиям напряжения на нагрузке.

Автоматическое регулирование возбуждения типа компаундирования и особенно релейная форсировка возбуждения СК узла нагрузки не дают существенного эффекта повышения динамической устойчивости, а наоборот ухудшают ее и способствуют более быстрому выпадению СК из синхронизма, так как последние при этом в первом цикле возникновения асинхронного хода воспринимают на себя значительно возросшую долю активной нагрузки и глубоко тормозятся. Не имея на своем валу постороннего вращающего момента и воспринимая при форсировке возросшую долю активной нагрузки СК интенсивнее расходует занасенную механическую энергию вращающихся масс ротора. Чем большую активную мощность выдает СК, тем быстрее затухает вращающий момент и тормозится ротор.

Одновременно увеличивается активная мощность, потребляемая нагрузкой, а следовательно, и дефицит мощности в узле нагрузки.

В результате происходит дальнейшее развитие аварийного режима, затрудняется ресинхронизация выпавшей из синхронизма

части системы и может установиться асинхронный режим с относительно большим скольжением, что представляет большую опасность для оборудования и потребителей электроэнергии.

Расчеты показывают, что предотвратить выпадение СК из синхронизма в узлах нагрузки со слабыми связями с энергосистемой возможно лишь при значительном уменьшении длительностей отключения К.З. на питающих ЛЭП и бестоковой паузы в цикле АПВ. При этом существенно возрастают требования к быстродействию отключающих аппаратов и устройств автоматики. В режиме максимальных нагрузок узла нарушение устойчивости СК происходит через 0,2-0,3 сек после начала К.З. и последующем трехфазном отключении основной питающей ЛЭП-220 кв, поэтому даже БАПВ обычно не предотвращает выпадение СК из синхронизма.

В узлах нагрузки с более сильными связями с энергосистемой (три и более питающие линии) создаются благоприятные условия для обеспечения динамической устойчивости СК.

Однако это не гарантирует от возможного выпадения СК из синхронизма при возмущениях в системе в случае работы узла с эксплуатационным или ремонтным отключением одной из основных питающих линий.

Для обеспечения устойчивости и восстановления нормальной работы во всех случаях в отношении СК обязательно применение специальных мероприятий защитного характера и устройств автоматики.

### 3. АСИНХРОННЫЙ РЕЖИМ И РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ СК

Задача исследования асинхронных режимов синхронных машин является одной из важнейших в проблеме повышения устойчивости и надежности современных энергосистем. Без знания характера изменения основных параметров переходного и асинхронного режимов нельзя правильно вести эксплуатацию машин, разрабатывать и выбирать средства противоаварийной автоматики.

Основной задачей исследования в настоящей главе является определение параметров асинхронного режима мощного СК и условий его ресинхронизации после нарушения устойчивости.

Основным методом исследования избран метод математического моделирования переходных процессов на АЭМ, основанный на решении упрощенных уравнений Парка-Горева для электромагнитно-

го состояния синхронной машины (СК). Использование такой математической модели для практических задач, связанных с исследованиями переходных процессов и вопросов ресинхронизации, позволяет достаточно полно отразить основные моменты (асинхронный, явнополюсности и др.), определяющие характер и параметры переходного режима.

В качестве объекта исследования принят узел нагрузки, в котором установлен мощный СК, связанный с энергосистемой большой мощности через внешний реактанс.

Для принятой в работе координатной системы осей имеем следующие уравнения для исследования устойчивости СК:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -\psi_q ; \\ U_q &= \psi_d ; \\ T_d \frac{d\delta}{dt} &= -M_{эм}, \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 s ; \\ M_{эм} &= \psi_d i_q - \psi_q i_d \end{aligned} \right\} (3-1)$$

Уравнение электромагнитных процессов в контурах ротора имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_f}{dt} &= \omega_0 (U_f \frac{z_f}{x_{ад}} - i_f z_f) ; \\ \frac{d\psi_{1d}}{dt} &= -\omega_0 i_{1d} z_{1d} ; \\ \frac{d\psi_{1q}}{dt} &= -\omega_0 i_{1q} z_{1q} \end{aligned} \right\} (3-2)$$

При решении уравнений электромагнитного переходного процесса в обмотке возбуждения учитывается регулирование возбуждения СК типа компаундирования с электромагнитным корректором и релейная форсировка возбуждения.

Система уравнений (3-1), (3-2) с учетом уравнений для погосцеплений и зависимостью напряжения на выводах статора СК от режима системы полностью описывает переходный процесс синхронного компенсатора.

Уравнения элементов внешней сети и нагрузки записывались в осях  $d$  и  $q$  СК и совместное решение уравнений основных элементов системы производилось с использованием баланса токов в узловых точках.

В результате проведенных на АВМ исследований установлено, что длительный асинхронный режим мощного СК с возбуждением опасен по соображениям целостности компенсатора. Максимальное значение тока статора при асинхронном ходе достигает  $5 I_{ном}$ , что значительно превышает допустимые:  $I_{доп} = (2,5-3) I_{ном}$ . Сynchronous компенсатор при этом подвергается повышенным тепловым и электродинамическим воздействиям, в результате которых может произойти повреждение машины.

В послеаварийном режиме и в случае успешного АПВ на поврежденной ЛЭП непосредственная синхронизация и восстановление нормального режима работы выпавшего из синхронизма СК без принятия специальных мер наблюдается только до определенных величин относительного среднего скольжения ротора ( $S \ll 0,2$ ). При скольжениях превышающих эти значения самопроизвольного втягивания в синхронизм возбужденного СК не происходит и устанавливается длительный асинхронный режим. Общая картина протекания процесса при этом такова. В связи с наличием демпферной обмотки выпавший из синхронизма СК получает мощность из сети как асинхронная машина, работающая со скольжением. С другой стороны, имея постороннее возбуждение, компенсатор работает как генератор, развивающий некоторую среднюю (собственную) мощность.

Возможность непосредственной синхронизации СК с возбуждением определяется количественным соотношением моментов машины. Если сумма ускоряющих синхронного и асинхронного моментов при соответствующем скольжении превышает сумму тормозящих синхронного момента и момента сопротивления вращающихся масс ротора, то компенсатор может синхронизироваться. В противном случае СК продолжает работать асинхронно и возможность его самопроизвольной синхронизации с возбуждением исключена. Значение предельного скольжения для СК в разных узлах нагрузки различно, поскольку величина асинхронного момента зависит в каждом конкретном случае от связи узла с системой.

Асинхронный режим СК, возникший в результате нарушения устойчивости, должен быть ликвидирован и должна быть восстановлена синхронная работа.

При выпадении из синхронизма синхронные компенсаторы обычно отключаются в первом же цикле асинхронного режима, и для восстановления синхронной работы должна быть проделана нормальная процедура разворачивания машины и ее синхронизация, требующая значительного промежутка времени.

При быстром отключении от сети выпавшего из синхронизма компенсатора осложняется его управление в послеаварийном режиме. Для мощных компенсаторов последующее АПВ СК с возбуждением исключается, так как токи при несинхронном включении возбужденного СК значительно превышают допустимые и могут вызвать повреждение машины. Это вызывает необходимость предварительно снятия возбуждения СК перед его включением. Подача возбуждения после включения СК в сеть возможна лишь по истечении некоторого промежутка времени, необходимого для подтягивания и вхождения его в синхронизм, так как включение возбуждения при большом скольжении СК может сопровождаться большими токами, значительными колебаниями напряжения и вызвать явления, опасные как для самого СК, так системы и узла нагрузки.

Во всех случаях при использовании в качестве противоаварийного мероприятия отключения с последующим АПВ компенсаторы даже при наличии средств автоматики на длительное время оказываются отключенными от сети.

В узлах нагрузки при этом может остро ощущаться дефицит реактивной мощности и возникнуть опасность нарушения статической устойчивости. Кроме того, снижается эксплуатационная надежность самих СК. Однако, при ближайшем рассмотрении вопроса необходимость быстрого отключения выпавших из синхронизма компенсаторов, как общее правило, представляется далеко не очевидной. Можно указать на ряд предпосылок, позволяющих сравнительно легко ресинхронизировать синхронный компенсатор без его отключения от сети. К числу таких предпосылок прежде всего следует отнести отсутствие механического момента на валу синхронных компенсаторов, сравнительно небольшой момент инерции роторов этих машин и наличие знакопеременного момента явнопольсности, вызванного магнитной несимметрией и не зависящего от возбуждения машин.

Угловая характеристика мощности явнопольсной машины определяется выражением:

$$P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta$$

Следовательно, электромагнитный момент такой синхронной машины помимо основной составляющей, зависящей от величины возбуждения, имеет также вторую составляющую, определяемую асимметрией ротора:

$$M_{\Pi} = \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta$$

Для СК типа КСВ-50 мвар при  $X_d = 2,46$  о.е.;  $X_q = 1,36$  о.е.,  $S_{\text{наз}} = 50$  мвар;  $U = 1$ ;  $M_{\text{н. макс}} = 0,165$ . Даже при отсутствии возбуждения явнополюсный СК имеет значительный электромагнитный момент, в то время как момент сопротивления механизма не превышает  $M_c \leq 0,02$ .

Эти факторы настолько существенны с точки зрения ресинхронизации, что при отключении возбуждения СК обуславливает втягивание в синхронизм в большинстве случаев нарушения устойчивости синхронных компенсаторов. Оказывается, что вопреки обычным (для синхронных генераторов) представлениям возбуждение СК оказывает несколько отличное влияние на возможность втягивания в синхронизм и СК легче синхронизируются при отсутствии возбуждения, нежели при максимальном, несмотря на заведомое, казалось бы, уменьшение синхронизирующей мощности.

При снятии возбуждения СК уже не может работать как генератор, развивающий некоторую среднюю мощность и частично питающий близлежащую нагрузку.

Следовательно, отсутствует момент, вызывающий в основном его торможения. СК в этом случае работает как асинхронная машина и подтягивается до подсинхронной скорости за счет асинхронного момента. Втягивание же в синхронизм происходит за счет знакопеременного момента явнополюсности, создающего пульсации скорости, в процессе которых ротор достигает синхронной скорости.

Во всех случаях снятия возбуждения на СК при асинхронном ходе осуществлялась его быстрая ресинхронизация и восстановление синхронного режима самого СК и нормального режима узла нагрузки.

В современных схемах автоматики параллельно обмотке возбуждения для избежания перенапряжений включается дополнительное гасительное сопротивление  $R_c = 0,5$  ом. Полное исчезновение поля ротора при этом происходит за  $I-1,5$  сек. При снятии возбуждения на первых циклах асинхронного режима время вхождения СК в синхронизм не превышает 2-3 сек.

Возможность практического осуществления ресинхронизации СК путем кратковременного снятия возбуждения проверялась экспериментами в энергосистеме на действующем СК мощностью 50 мвар.

Следовательно, отключением возбуждения, можно легко и быстро осуществлять ресинхронизацию выпавшего из синхронизма СК, а в некоторых случаях вообще предотвратить выпадение.

После восстановления режима можно немедленно подавать возбуждение и тем самым восстанавливать нормальный режим работы компенсатора, так как отсутствует скольжение СК.

С точки зрения быстрого восстановления нормальной работы СК и участия его в ликвидации последствий аварии ресинхронизация представляется более предпочтительной. В процессе ресинхронизации отсутствуют операции отключения и включения высоковольтного масляного выключателя; это, безусловно, повышает надежность всей схемы управления компенсатором, что в условиях аварии в энергосистеме особенно важно.

При ресинхронизации несколько больше, чем при отключении СК от сети, снижается напряжение в узле нагрузки, так как компенсатор без возбуждения потребляет из сети реактивную мощность, величина которой вследствие пониженной величины воздушного зазора незначительна и составляет  $(0,25-0,3) Q_n$ . Уровень минимального напряжения в узле при этом во многом определяется соотношением мощностей нагрузки узла и СК, линиями связи и т.д.

В одном из крупных узлов нагрузки энергосистемы с действующим СК были экспериментально сняты статические характеристики нагрузки по напряжению, позволяющие определить критические уровни понижений напряжения и опасность нарушения статической устойчивости. Критические напряжения современного крупного узла нагрузки составляют около 65-70% номинального.

Кроме того, на АВМ были определены допустимые длительности кратковременных снижений напряжения с учетом динамических характеристик нагрузки, учитываемых по уравнениям эквивалентного асинхронного двигателя.

Нарушение устойчивости и опрокидывание а.д. не происходит при кратковременных снижениях напряжения значительно ниже критического, так как при этом определяющее влияние оказывают инерционные свойства двигательной нагрузки. Опасность опрокидывания асинхронных двигателей нагрузки возникает при глубоких и длительных снижениях напряжения ниже критического.

Поскольку время вхождения СК в синхронизм не превышает 2-3 сек. некоторое снижение напряжения в узле при этом не повлияет на работу потребителей.

При более длительном и глубоком снижении напряжения отключение СК производит имеющаяся на всех современных СК защита от понижения напряжения на выводах СК ( $U_{кр} = 15-20\% U_{ном}$  с выдержкой  $t = 10$  сек).

На основании изложенного была предложена простая схема автоматики для ресинхронизации СК. Предложенная схема при наличии устройства, выявляющего асинхронный режим, используется в качестве исполнительного органа противоаварийной автоматики.

#### 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СК

Выявление асинхронных режимов в энергосистеме связано с трудностями теоретического и конструктивного характера, обусловленными необходимостью сбора и передачи информации об изменении физических величин в различных удаленных точках электрической системы.

При существующем положении вещей, когда каналы связи загружены и их недостаточно, стремятся получить сигнал об асинхронном ходе на основе информации из одной точки сети, используя фазовые соотношения параметров режима в этой точке. Однако устройства при таком решении получаются довольно сложными и обладают низкой избирательностью по отношению к асинхронному режиму. Известны также устройства, в которых с помощью простых средств удалось избежать телепередачи вектора напряжения из удаленной точки сети.

Этот вектор может быть моделирован эквивалентным напряжением, получаемым суммированием фазного напряжения на шинах данной точки системы с падением напряжения в той же фазе линии связи до искомой точки системы  $U_{экв} = U_{ф} + I_{ф} Z_{л}$ . Сравнивая на

фазоизмерительном элементе эквивалентное напряжение с напряжением в данной точке системы, можно судить о поведении системы.

Во многих практических случаях процесс выпадения из синхронизма и возникновения асинхронного режима синхронных машин происходит в период длительного несимметричного нарушения режима (двухфазное к.з. и т.п.).

Следовательно, вышеназванные устройства не могут во всех режимах обеспечить правильную и надежную работу защитных средств от асинхронного хода. Этот недостаток особенно ощутим в тех случаях, когда необходимо ликвидировать асинхронный режим уже в первом его цикле при угле  $90-180^\circ$  между векторами. Нами предложено, разработано и изготовлено новое устройство для выявления асинхронного хода синхронных генераторов и компенсаторов, свободное от указанных недостатков.

Устройство предназначено для определения угла расхождения векторов напряжения (э.д.с.) прямой последовательности между двумя точками системы при любых режимах и содержит измерительные элементы в цепях тока и напряжения и фазочувствительный исполнительный орган.

Устройство позволяет моделировать два удаленных от исходной точки системы вектора напряжения. В этом возникает необходимость в тех случаях, когда электрический центр качаний может находиться вне связи данного узла с синхронной машиной.

Для контроля угла между векторами э.д.с. и напряжения в устройстве используется разработанное нами новое полупроводниковое реле сравнения фаз РСФ, угловая характеристика срабатывания которого практически не зависит от величин напряжения сравниваемых сигналов. Уставка срабатывания РСФ может регулироваться в диапазоне изменения угла  $90-170^\circ$ .

Разработанное устройство выявления асинхронного хода прошло экспериментальную проверку на упрощенной динамической модели в лаборатории электрических станций Белорусского политехнического института.

Проведенные испытания подтвердили надежную и правильную работу устройства для выявления асинхронного хода. Предлагаемое устройство может быть использовано для ликвидации асинхронного хода уже в первом его цикле при угле между векторами  $90-170^\circ$ . Кроме того, оно при необходимости может служить датчиком счетчика циклов коммутационных проворотов.

Успешные испытания выявителя асинхронного хода позволили решить задачу автоматизации восстановления нормального режима работы СК на основе ресинхронизации. Важность для энергосистемы решения этого вопроса очевидна, так как она упрощает проблему устойчивости СК и узла нагрузки при любых аварийных ситуациях.

Устройство ресинхронизации с выявителем выпадения СК из синхронизма внедрено в Белорусской энергосистеме.

Основные результаты выполненных в диссертационной работе исследований заключаются в следующем:

1. Предложена программа расчета динамической устойчивости энергосистемы на ЭЦВМ "Минск-22". Программа проста и удобна при выполнении проектных и эксплуатационных расчетов устойчивости энергосистем.

2. Проведено исследование поведения мощных синхронных компенсаторов и оценка их динамической устойчивости при аварийных ситуациях в конкретной энергосистеме. Выявлено, что нарушение устойчивости и асинхронный ход СК наиболее часто происходит в узлах нагрузки со слабыми связями с энергосистемой.

3. Показано, что асинхронный режим мощного компенсатора с возбуждением опасен по соображениям целостности СК. Максимальное значение тока статора при асинхронном ходе превышает допустимое и достигает  $5 I_{ном}$ . Во избежание повреждения СК необходимо применение мер защитного характера.

4. Проведено исследование режима ресинхронизации СК и поведение нагрузки в этом режиме. Обоснована допустимость и целесообразность ресинхронизации компенсатора путем кратковременного снятия возбуждения.

Ресинхронизация СК является наиболее эффективным средством восстановления нормального режима и упрощает проблему устойчивости СК и узла нагрузки при любых режимах и аварийных ситуациях.

Возможность практической осуществимости ресинхронизации СК проверена испытаниями на действующем компенсаторе типа КСВ - 50 тыс. кв.а в одном из узлов нагрузки Белорусской энергосистемы.

В настоящее время ресинхронизация может применяться для большинства мощных синхронных компенсаторов и имеет следующие преимущества:

а) простоту, практически исключающую возможность ошибочных действий;

б) быстроту восстановления нормального режима СК, имеющую особенно важное значение во время ликвидации аварии;

в) упрощение автоматизации синхронных компенсаторов;

г) незначительную стоимость применяемых устройств и средств противоаварийной автоматики.

6. Разработано и исследовано устройство для выявления асинхронного хода. Устройство предназначено для определения угла расхождения векторов напряжений (э.д.с.) между двумя точками системы в симметричных и несимметричных режимах.

Простота и надежность предложенного устройства позволяют рекомендовать его для широкого внедрения в энергосистемах как для СК, так и для синхронных генераторов.

7. Предложена простая схема автоматической ресинхронизации синхронного компенсатора.

8. Разработанная и осуществленная на синхронных компенсаторах в Белорусской энергосистеме защита от асинхронного хода: предотвращает повреждение СК при нарушении устойчивости и асинхронном ходе; позволяет автоматизировать процесс восстановления нормального режима работы СК и узла нагрузки за весьма малое время на основе использования ресинхронизации.

9. Устройство для выявления асинхронного хода в сочетании со схемой автоматической ресинхронизации является эффективным средством сохранения генерирующей мощности СК во всех случаях системных аварий и может быть рекомендовано как основной метод автоматического восстановления нормального режима.

Основные положения работы обсуждались на II и III республиканских научно-технических конференциях в г.Минске по вопросам применения вычислительной техники в энергетике, на X и XI научно-технических конференциях аспирантов ЭНИИ в г.Москва и опубликованы в следующих статьях:

Г. Громов Д.И., Новаш В.И., Рогов Л.Д., Сениягин Ю.В. Расчет динамической устойчивости синхронного компенсатора на ЭЦВМ "Минск-2". Материалы II республиканской конференции по применению вычислительной техники в энергетике. Минск, 1968.

2. Александров И.Н., Новаш В.И., Рогов Л.Д., Сениягин Ю.В. Автоматическая ресинхрони-

зация синхронных компенсаторов. "Электрические станции", № 3, 1969.

3. С е н я г и н Ю.В., Б а м п и Ю.С. О динамической устойчивости синхронных компенсаторов в узлах нагрузки. Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии. Минск, 1970.

4. Н о в а ш В.И., Р о г о в Л.Д., С е н я г и н Ю.В., К л ю в е р Н.Ф. Статическая устойчивость узла нагрузки. Электротехника, вып. I. Изд. "Высшая школа". Минск, 1971.

5. Б а м п и Ю.С., С е н я г и н Ю.В. Использование ЭЦВМ для анализа динамической устойчивости синхронных компенсаторов.-Применение автоматики и вычислительной техники для повышения надежности и экономичности работы энергосистемы. Изд. "Наука и техника". Минск, 1971.