

ЭНЕРГЕТИКА

Г. А. АЙРАПЕТЯН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НЕСИНХРОННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ
ПОВТОРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

При исследовании режимов энергосистем, связанных с несинхронными автоматическими повторными включениями (НАПВ) межсистемных электропередач в целом ряде случаев возникает необходимость представления системы схемой замещения с несколькими источниками э. д. с. и сохранением основных узлов нагрузок. В большинстве случаев несинхронные процессы в объединенных системах не могут быть сведены к работе двух станций и тем более к работе станций на шины бесконечной мощности. Оказывается необходимым выявить и оценить те факторы, которые в объединенных энергосистемах влияют на характер происходящих процессов. В чем же заключаются главные отличия процессов в объединенных энергосистемах от процессов при аналогичных исследованиях работы отдельных станций с мощными системами? Необходимо отметить, во-первых, возможность появления трех и более частот в процессе ресинхронизации, т. е. другими словами в любой из двух несинхронно вращающихся частях системы может иметь место выход из синхронизма части генераторов; во-вторых, малые величины скольжения и изменения скоростей генераторов при выпадении из синхронизма и при НАПВ, в-третьих, значительное влияние на ход процесса поведения нагрузок, потерь активной мощности от токов несинхронного включения и к.з. и др.

Данная работа посвящается рассмотрению методики определения структуры расчетных схем замещения и, связанным с этим, нахождением критериев допустимости несинхронного АПВ.

Выбор структуры расчетных схем замещения

В объединенных системах обычно сопротивления межсистемных электропередач оказываются соизмеримыми с сопротивлениями ветвей схемы замещения отдельных систем, входящих в объединение. Это приводит к тому, что часть станций систем активно участвуют в динамических процессах. Однако, степень участия отдельных станций неодинакова. Одной из задач при эквивалентировании сложных систем

* Работа выполнялась под руководством проф. Г. Т. Адонца.

является выявление групп станций, которые в исследуемом процессе работают синхронно, что дает возможность объединения их в одну эквивалентную станцию.

Заметим, что представление объединенных систем двумя станциями, широко применяемая в исследованиях для упрощения расчета, во многих случаях значительно искажает результаты расчета и приводит к ошибочным выводам. В ряде случаев, приемлемым является представление системы тремя станциями.

В Институте энергетики АН Армянской ССР с помощью модели сетей переменного тока (МСПТ)[1] и на вычислительных машинах непрерывного действия (ВМНД) были проведены исследования динамической устойчивости и несинхронного автоматического повторного включения межсистемных электропередач Закавказской объединенной энергосистемы, путем представления схемы замещения системы различным количеством станций, что позволило прийти к некоторым выводам.

Отметим некоторые положения теории параллельной работы синхронных машин. Известно следующее уравнение [2] равновесия моментов на валу ротора синхронной машины:

$$T \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - \Delta P_p - P_c - P_{ac}, \quad (1)$$

где P_T — вращающаяся мощность турбины, до изменения скорости;
 ΔP_p — изменение вращающейся мощности турбины под действием регулятора скорости;
 P_c — мощность, обусловленная током обмоток возбуждения и реакционным моментом;
 P_{ac} — асинхронная мощность, обусловленная действием успокоительных обмоток;
 T — постоянная инерции агрегата.

Входящая в уравнение (1) мощность P_c для случая системы, из трех генераторов, определяется следующим выражением:

$$P_m = E_m^2 y_{mm} \cos \varphi_{m,m} + E_m E_n y_{mn} \cos (\delta_{mn} + \varphi_{mn}) + E_m E_l y_{ml} \cos (\delta_{ml} + \varphi_{ml}), \quad (m, n, l = 1, 2, 3); \quad (2)$$

где E — э.д.с. генераторов функция времени, определяемая переходными процессами в роторе и статоре машины.

Параметры y и φ , характеризующие собственные и взаимные сопротивления, оказываются зависимыми также от переходных процессов в нагрузках [3].

Для явнополюсной машины аналогичные выражения составляются для осей d и q . Однако, в ряде случаев для технических расчетов, в выражении (2) оказывается достаточным величины E , y и φ считать неизменными и ограничиться замещением машины в одной оси d . Это осуществляется путем введения понятия э.д.с. за переходным сопротивлением E' и сохранения этой величины, в динамических

процессах, неизменной, чем приближенно учитываются переходные процессы в роторе и работа регуляторов напряжения. Пренебрегая также активным сопротивлением статора, можно выразить выдаваемую мощность, как синусоидальную функцию от угла δ .

Для выявления физического смысла членов этого равенства приведем исследуемую схему замещения системы из пяти генераторов к виду рис. 1. Эта схема эквивалента исходной, если принять:

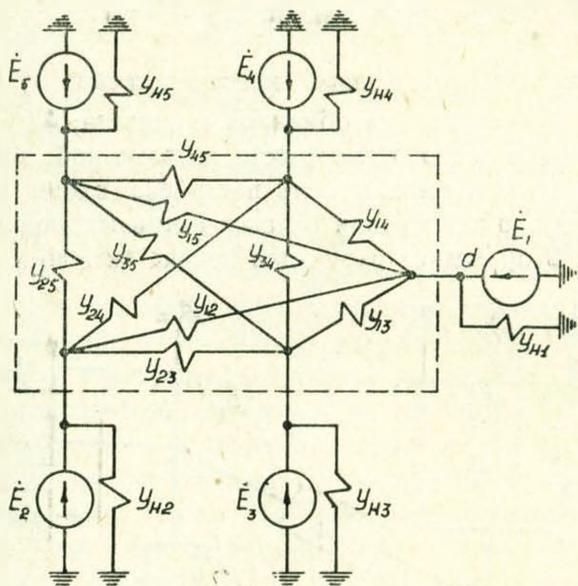


Рис. 1.

$$Y_{H1} = Y_{11} - Y_{12} - Y_{13} - Y_{14} - Y_{15};$$

$$Y_{H2} = Y_{22} - Y_{21} - Y_{23} - Y_{24} - Y_{25}, \text{ и т. д.}$$

где $Y_{11}, Y_{22}, Y_{12}, Y_{13}, \dots$ — собственные и взаимные проводимости исходной схемы. Тогда выражение мощности для случая работы двух генераторов записывается в следующем виде:

$$P_1 = E_1'^2 g_{H1} + E_1' E_2' b_{12} \sin \delta_{12} - E_1' E_2' g_{12} \cos \delta_{12}, \quad (3)$$

где g и b — соответственно активные и реактивные проводимости. Аналогично получаются выражения для схемы с тремя генераторами. В правой части выражения (3) первый член представляет из себя активную мощность, расходуемую на нагрузку, включенную к источникам э.д.с., третий член — обменную активную мощность, как функцию $\sin \delta$, а алгебраическая сумма второго и четвертого членов — приблизительно половину активных потерь во взаимном сопротивлении. Последнее видно из следующего: потери активной мощности во взаимном сопротивлении могут быть определены, как разность мощностей в начале и в конце взаимного сопротивления. Потери мощности во взаимном сопротивлении будут равны:

$$\Delta P = P_H - P_k = (E_1'^2 + E_2'^2) g_{12} - 2 E_1' E_2' g_{12} \cos \delta_{12}. \quad (4)$$

Действительно, из сопоставления (3) и (4) видно, что сумма второго и четвертого членов приблизительно равна половине потерь. Вторая половина потерь покрывается второй станцией.

Окончательно выражение для мощности станции без учета успокоительных обмоток можно представить так:

$$P_c = P_{H1} + P_{\max} \sin \delta_{12} + \frac{\Delta P_{12}}{2}, \quad (6)$$

где P_{H1} — нагрузка, включенная непосредственно у источника э.д.с. $P_{\max} = E_1' E_2' b_{12}$ — амплитуда обменной мощности; $\Delta P = 2 E_{cp}'^2 g_{12} (1 - \cos \delta_{12})$ — потери активной мощности во взаимной проводимости Y_{12} . Согласно формуле (6) может быть построена схема замещения, действительная при рассмотрении баланса активных мощностей.

На рис. 2 приведена схема для потока активных мощностей, для

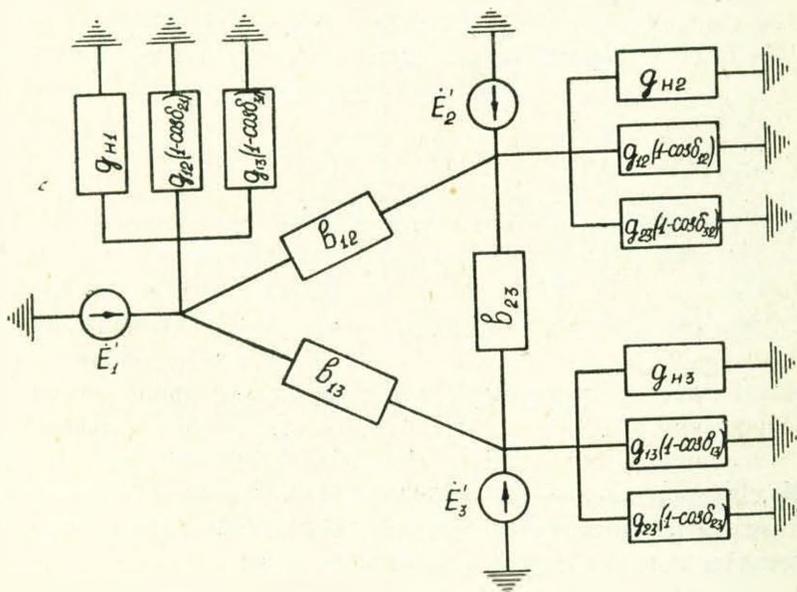


Рис. 2.

случая трех эквивалентных генераторов. Схема в таком виде удобна для нахождения критерия допустимости НАПВ.

Условие, исключающее появление третьей частоты в энергосистеме при ресинхронизации

Принято процесс ресинхронизации разбивать на несколько интервалов, каждый из которых характеризуется различным влиянием приложенных к ротору моментов. Так, на процесс ресинхронизации до подхода к подсинхронной скорости большое влияние оказывают

асинхронный момент и момент от действия регуляторов скорости, зависящие главным образом от скольжения и абсолютной скорости. В период же вхождения в синхронизм влияние этих факторов уменьшается.

В [4] описаны практические методы расчета времени и числа циклов до момента уменьшения скольжения до нуля с учетом указанных факторов. Такие процессы всегда могут быть исследованы по двухмашинной схеме замещения. Для такого исследования широко применяются аналоговые вычислительные машины или же аналитические расчеты.

Однако эти методы оказываются недостаточно приемлемыми для исследования процесса втягивания в синхронизм. Процесс ресинхронизации может оказаться неуспешным из-за возможности появления сильных синхронных качаний, внутри несинхронно вращающихся частей системы, что может привести к выходу из синхронизма других машин, помимо двух несинхронно вращающихся частей системы. Неуспешная ресинхронизация в этих случаях объясняется периодическими переходами кинетической энергии несинхронно вращающихся частей системы в кинетическую энергию, связанную с синхронными качаниями и несинхронным ходом других машин и обратно. Такое явление мешает погасить указанную энергию регулирующими устройствами, что приводит к затягиванию процесса ресинхронизации.

Таким образом, возникает необходимость исследования процесса не по двухмашинной схеме замещения, а по схеме с большим количеством станций. Увеличение числа станций очень осложняет расчеты на ВМНД, так как требует одновременного применения большого количества таких машин. Представляется более целесообразным применение для таких расчетов МСПТ в сочетании с одной-двумя машинами непрерывного действия. Необходимость учета большого количества генераторов возникает при исследовании процесса подхода к нулевому среднему скольжению. В этот период возможен выход из синхронизма других генераторов. Малые скольжения обуславливают большое влияние на процесс следующих факторов: взаимный момент; потери активной мощности; уменьшение потребляемой мощности из-за снижения напряжения на нагрузках. Влияние же асинхронного момента и регулирования скорости на процесс существенно не влияют. Рассмотрим схему из трех эквивалентных генераторов (рис. 2). Пусть требуется выяснить при каких условиях Γ_2 может выйти из синхронизма по отношению к Γ_3 , имея в виду, что Γ_1 вращается несинхронно относительно Γ_3 .

Рассмотрим 4 возможных случая несинхронного хода трехгенераторной системы:

1. Γ_1 вращается несинхронно с положительным скольжением ($S_1 > 0$) по отношению к Γ_2 и Γ_3 (т. е. Γ_1 ускоряется);

2. То же, но с отрицательным скольжением ($S_1 < 0$) т. е. Γ_1 замедляется;

3. Γ_1 и Γ_2 вращаются несинхронно (с $S > 0$) по отношению к Γ_3 , т. е. Γ_1 и Γ_2 ускоряются;

4. То же, что и п. 3, но с отрицательным скольжением ($S < 0$), т. е. Γ_1 и Γ_2 тормозятся.

Исследуем первый и второй случай. Заметим, что для того, чтобы Γ_2 вышел из синхронизма по отношению к Γ_3 , необходима определенная энергия, которая может быть передана Γ_2 только от Γ_1 , обладающего излишней энергией ($S > 0$). Односторонняя передача энергии может продолжаться до момента, когда вектора э.д.с. Γ_1 , с одной стороны, Γ_2 и Γ_3 с другой, окажутся в противофазе т. е. в неустойчивом равновесии. Случай, когда с достижением неустойчивого равновесия кинетическая энергия, полученная при возмущении, подходит к нулю, примем в качестве наиболее тяжелого случая с точки зрения выпадания из синхронизма других машин.

В данной работе рассматривается именно этот случай. Перед тем, как перейти к рассмотрению процесса выхода из синхронизма, примем следующие два условия: во-первых, генератором Γ_3 будем замещать мощную систему, момент инерции которой может быть принят равным бесконечности, т. е. $T_3 = \infty$; во-вторых, что во время движения генератора Γ_1 , в связи с медленным нарастанием скорости Γ_2 , последний, в начале не успевает сколько-либо заметно изменить свое положение по углу, т. е. угол δ_{023} остается неизменным; движение Γ_2 начинается в то время, когда Γ_1 уже медленно подходит к положению неустойчивого равновесия, истратив всю излишнюю энергию. Аналогично и при движении Γ_2 , Γ_1 не меняет своего положения.

Приняв это допущение, процесс как бы делим на два этапа: в первом этапе кинетическая энергия несинхронно вращающегося генератора Γ_1 переходит в потенциальную энергию системы: во втором этапе, потенциальная энергия системы переходит в кинетическую энергию движения Γ_2 .

Считая рассматриваемый поворот ротора Γ_1 последним перед вхождением в синхронизм, полагаем, что Γ_1 , обладая еще запасом энергии, может задержаться некоторое время в положении неустойчивого равновесия к Γ_3 . Это время может оказаться достаточным, чтобы Γ_2 сам подошел к положению неустойчивого равновесия относительно Γ_2 и Γ_3 .

Происходит как бы захват генератором Γ_1 генератора Γ_2 . Возможен случай, когда на Γ_2 , при неустойчивом положении равновесия Γ_1 , будет действовать момент против направления движения Γ_1 , что означает невозможность захвата, т. е. выхода из синхронизма Γ_2 . Таким образом, для нахождения условия выхода из синхронизма Γ_2 при несинхронном движении Γ_1 , необходимо определить угол δ'_{13} , соответствующий положению неустойчивого равновесия Γ_1 относительно Γ_2 и Γ_3 при неизменном угле δ_{23} , равном δ_{023} ; затем определить знак момента, действующего на Γ_2 , при неизменном угле между Γ_1 и Γ_3 , равном δ'_{13} . Если этот момент действует в том же направлении, в кото-

ром движется генератор Γ_1 , то необходимо дальнейшее исследование для выяснения возможности выхода из синхронизма Γ_2 , если же в противоположном, то выход из синхронизма Γ_2 исключается. Таким образом первым достаточным условием невозможности выхода из синхронизма Γ_2 будет:

$$\begin{aligned} P_{20} > 0 & \text{ при } S_1 < 0; \\ P_{20} < 0 & \text{ при } S_1 > 0. \end{aligned} \quad (10)$$

При несоблюдении этого условия, необходимо обратиться ко второму условию. Для нахождения его необходимо, приняв угол δ_{13} неизменным, определить угол δ_{23} , соответствующий положению неустойчивого равновесия Γ_2 относительно Γ_3 и Γ_1 ; далее выяснить достаточно ли запасенная в системе потенциальная энергия для обеспечения движения генератора Γ_2 от δ_{023} до δ_{23} , иначе говоря необходимо определить знак энергии движения Γ_2 . Несовпадение знака энергии Γ_2 со знаком момента, действующего на Γ_2 в положении, соответствующем углу δ_{023} , будет означать недостаток энергии для выхода из синхронизма, а совпадение—о излишке энергии, т. е. о возможности выхода из синхронизма.

Таким образом, вторым достаточным условием, исключающим выход из синхронизма Γ_2 будет условие:

$$\text{Sgn } \dot{\gamma}_2 \neq \text{Sgn } P_{20}. \quad (11)$$

Несоблюдение условия (11) означает, что выход из синхронизма Γ_2 возможен, но при неблагоприятном характере протекания процесса. Здесь имеется ввиду, как угол несинхронного включения Γ_1 , так и угол, при котором скольжение становится равным нулю. Таким образом задача сводится к определению углов δ_{13} , δ_{23} , а также знака энергии $\dot{\gamma}_2$ и момента P_{20} . Расчетные формулы для определения указанных величин будут даны в следующей статье автора по затронутому вопросу.

Институт энергетики
АН Армянской ССР

Поступило 22.VI.1963

Դ. Ա. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ՈՉ ՍԻՆԽՐՈՆ ՄԻՋՄԻՍՏԵՄԱՅԻՆ ԳԾԵՐԻ
ԱՎՏՈՄԱՏ ԿՐԿՆԱԿԻ ՄԻԱՅՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԱՐՑԵՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Էլեկտրահաղորդման գծերում ոչ սինխրոն ալտոմատ կրկնակի միացման (ՈԱԿՄ) հնարավորությունը պարզելու համար անհրաժեշտ է լինում ուսումնասիրել ուսինխրոնիզացիայի պրոցեսը: Այդ ուղղությամբ կատարված են մի շարք աշխատանքներ այնպիսի դեպքի համար, երբ էներգոսխտեմը բաղկացած է 2 համարժեք գեներատորային կայաններից: Նման դեպքը հնարավորություն է

տալիս վերջնական եզրակացություն կատարել ՌԱԿՄ-ի կիրառման հնարավորության վերաբերյալ, քանի որ էներգոսխտեմում ռեսինխրոնիզացիայի պրոցեսում հնարավոր է սինխրոնիզմի խախտում մյուս մեքենաների կողմից:

Սույն աշխատանքը նվիրված է միացյալ էներգոսխտեմների ՌԱԿՄ-ի հետադոմանը, երբ սխտեմը ներկայացված է 3 համարժեք գեներատորներով:

Հողվածում մշակված են կրիտերիաներ, որոնք բացառում են մյուս մեքենաների սինխրոնիզմից դուրս գալու հնարավորությունը: Ապացուցված է, որ այդ կրիտերիաները միաժամանակ հանդիսանում են ՌԱԿՄ-ի թուլատրելիության կրիտերիաներից մեկը: Այդ կրիտերիաների օգտագործումը պրակտիկայում հնարավորություն է տալիս նախնական եզրակացության գալ, թե ինչպիսի հաղորդման հզորությունների դեպքում տվյալ էլեկտրահաղորդման գծում ՌԱԿՄ-ի կիրառումը ապահովում է հաջող ռեսինխրոնիզացիա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адонц Г. Т., Акопджанян Г. Д., Гамбурян К. А., Мартиросян М. А. Модель сетей переменного тока АН Армянской ССР. Известия АН Армянской ССР, № 6, 1961.
2. Лебедев С. А., Жданов П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем, Энергоиздат, М., 1934.
3. Адонц Г. Т. Теория многополюсников. Изд. АН Армянской ССР (находится в печати).
4. Информационный материал. Ресинхронизация в энергосистемах после несинхронного АПВ. Всесоюзный НИИ электроэнергетики. М., 1959.