

Сенегов П. Н.

Электро – Механические переходные процессы

Содержание

ВВЕДЕНИЕ, 2	10. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ, 15
1. ПОНЯТИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, 2	11. ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОМЕНТА ТУРБИНЫ ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ, 16
2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, 2	12. ПОНЯТИЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, 16
3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, 3	13. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ, 17
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, 5	14. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ, 18
5. ПОНЯТИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, 6	14.1 Модель нагрузки, 18
6. ПОНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, 6	14.2. Принцип действия асинхронного двигателя, 18
7. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ, 7	14.3. Характеристика электромагнитного момента асинхронного двигателя, 19
7.1. Влияние продольного индуктивного сопротивления, 7	14.4. Статическая устойчивость асинхронного двигателя, 21
7.2. Влияние активных сопротивлений элементов, 7	14.5. Влияние напряжения питания асинхронного двигателя на его устойчивость, 21
7.3. Влияние шунтирующего индуктивного сопротивления, 8	14.6. Влияние параметров элементов электрической системы на устойчивость асинхронного двигателя, 21
7.4. Влияние шунтирующего емкостного сопротивления, 8	14.7. Влияние частоты электрической системы на устойчивость асинхронного двигателя, 22
7.5. Влияние промежуточного отбора мощности, 9	15. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ, 23
8. ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ, 10	16. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ, 24
8.1. Характеристика момента (мощности) регулируемого генератора, 10	ЗАКЛЮЧЕНИЕ, 26
8.2. Параметры АРВ генератора и их влияние на статическую устойчивость, 11	ЛИТЕРАТУРА, 26
9. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ, 15	

Челябинск

1996

ВВЕДЕНИЕ

Аварии, связанные с нарушением устойчивости работы электрических машин в электрических системах, влекут за собой расстройство электроснабжения больших районов и городов. Ликвидация таких аварий и восстановление нормальных условий работы электрических систем представляют большие трудности, требуют много времени и усилий оперативного персонала. При сравнительно небольшом числе аварий, вызывающих нарушение устойчивости, наибольший аварийный недоотпуск энергии падает именно на этот вид аварий. Тяжелые последствия таких аварий заставляют уделять значительное внимание вопросам обеспечения должного уровня устойчивости как при проектировании электрических станций, так и при их эксплуатации.

Достаточно строгие и полные ответы на вопросы устойчивости электрических систем изложены в монографиях [1-3], рекомендуемых студентам при изучении дисциплины “Электромеханические переходные процессы в электрических системах”. Однако в них где в большей, а где в меньшей степени превалирует в ущерб качественно-количественный подход к раскрытию сути протекающих в электрической системе переходных процессов. В то же время в практических ситуациях, как при формулировке задачи и ходе исследования или проектирования, так и при оперативном управлении электрической системой необходим этап качественной оценки. С целью совершенствования навыков качественного анализа в настоящем пособии основополагающие понятия устойчивости электрических систем обсуждены с опорой на физическую суть протекающих в них процессов.

1. ПОНЯТИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электрическая система должна работать надежно. Одним из условий надежной работы является ее устойчивость, под которой понимается способность системы восстанавливать нормальный режим работы после большого или малого возмущения режима системы. Основными параметрами, по которым судят об устойчивости системы, являются скорости вращения входящих в нее синхронных машин. В нормальном режиме эти скорости у всех синхронных машин одинаковы, постоянны и равны синхронной.

Различают три вида устойчивости электрической системы.

Статическая устойчивость - устойчивость системы при малых возмущениях режима, возникающих по причине, например, включения или отключения маломощных источников и потребителей электроэнергии, изменения конфигурации распределительных сетей и т.п.

Динамическая устойчивость - устойчивость системы при больших возмущениях режима, возникающих, например, из-за коротких замыканий, включения или отключения мощных источников и потребителей электроэнергии, изменения конфигурации системообразующей сети и т.п.

Результирующая устойчивость-способность восстанавливать после относительно короткого периода нарушения нормальный режим системы за счет ее внутренних свойств либо под действием специальных устройств системной противоаварийной автоматики.

2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Вопросы устойчивости будут обсуждаться применительно к модели простейшей электрической системы, однолинейная схема которой приведена на рис.2.1. Модель системы содержит вращаемый турбиной Т генератор Г, повышающий трансформатор Т1, двухцепную линию электропередачи Л, понижающий трансформатор Т2 и приемную электрическую систему С, состоящую из подключенных к общим шинам генератора Гс и нагрузки Н. При этом генератор Г через трансформатор Т1, выключатели В, двухцепную линию Л и трансформатор Т2 подключен к шинам приемной системы С. Турбина создает момент Мт, под действием которого генератор вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ωt . На шинах генератора Г и приемной системы присутствуют напряжения соответственно U_g и U_c .

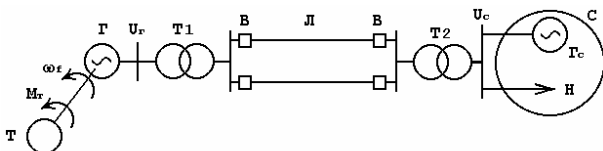


Рис. 2.1

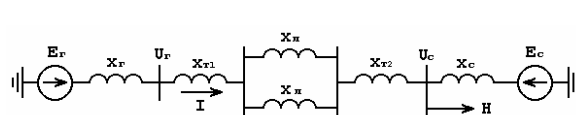


Рис. 2.2

Первоначально примем следующие допущения: отсутствует регулирование возбуждения генераторов Г и Гс, т.е. их ЭДС E_g и E_c неизменны; отсутствуют активные потери в элементах электрической системы, т.е. их активные сопротивления равны нулю; линия электропередачи не генерирует зарядной мощности; скорость вращения ωc генератора Гс приемной системы постоянна. С учетом принятых допущений на рис.2.2 изображена электрическая схема замещения модели простейшей электрической системы.

Здесь x_g , x_c , x_{r1} , x_{r2} , x_l - индуктивные сопротивления соответственно генератора Г, приемной системы С, трансформаторов Т1, Т2 и одной цепи линии Л; I - ток в цепи.

Полагая также первоначально мощность приемной системы бесконечно большой ($x_c=0$), а также заменяя сопротивления x_g, x_{t1}, x_{t2} одним результирующим сопротивлением x , схему замещения модели системы приводим к виду, представленному на рис.2.3.

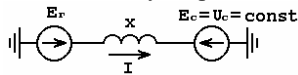


Рис. 2.3

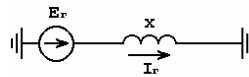


Рис. 2.5

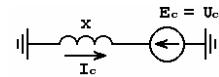


Рис. 2.7

Генератор Г представляет собой трехфазный неявнополюсный синхронный генератор с обмоткой возбуждения f на роторе и тремя обмотками фаз А,В,С на статоре. Поперечный разрез генератора Г приведен на рис.2.4.

Представим магнитное поле генератора Г в виде отдельных составляющих. Для этого режим электрической системы (рис.2.1) условно разделим на два. Первый - режим с замкнутыми накоротко шинами приемной системы. Соответствующая этому режиму схема замещения электрической системы приведена на рис.2.5 и получена из схемы замещения (рис.2.3).

При протекании тока I_f в обмотке возбуждения генератора создается магнитное поле. С учетом конструкции обмотки возбуждения в большинстве применяемых генераторов полагаем, что пространственное распределение намагничивающей силы этого поля вдоль воздушного зазора имеет синусоидальный характер. Учитывая, что магнитная проницаемость ферромагнитных частей статора и ротора генератора значительно больше магнитной проницаемости воздуха, без существенной погрешности будем считать синусоидально распределенной в воздушном зазоре вдоль окружности ротора и пропорциональную намагничивающей силе индукцию B_f этого магнитного поля (рис.2.6).

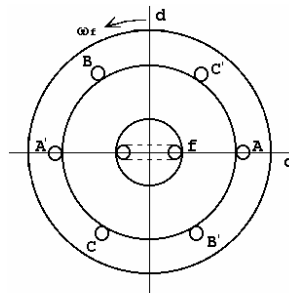


Рис. 2.4

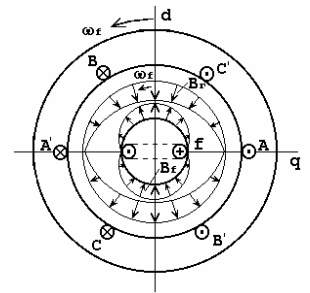


Рис. 2.6

Поле с индукцией B_f , вращаясь со скоростью ω_f наводит в фазных обмотках А,В,С генератора ЭДС E_g , под действием которой в цепи (рис.2.5) протекает ток I_g . Ток I_g , протекая по обмоткам фаз А,В,С генератора, создает в его воздушном зазоре вращающееся со скоростью ω_f магнитное поле с индукцией B_g , согласно закону Ленца встречно направленное магнитному полю с индукцией B_f .

Поле с индукцией B_g создано токами фазных обмоток и поэтому распределено в воздушном зазоре генератора вдоль окружности статора по ступенчатому закону, но с целью упрощения последующих рассуждений без видимого ущерба на получаемые результаты учтем только первую гармонику этого закона, т.е. будем считать этот закон синусоидальным. Распределение индукции B_g в воздушном зазоре генератора приведено на рис.2.6.

Второй - режим с замкнутой обмоткой возбуждения генератора Г ($E_g=0$). Схема замещения электрической системы для этого режима приведена на рис.2.7.

Под действием ЭДС E_c в цепи (рис.2.7) появляется ток I_c , который, протекая по обмоткам фаз А,В,С генератора, создает в его воздушном зазоре вращающееся со скоростью ω_c магнитное поле с индукцией B_c . Направление этого поля противоположно направлению поля с индукцией B_g , так как при принятом условии синфазности и действии в противоположном направлении ЭДС E_g и E_c , последняя в схеме (рис.2.7) определяет ток I_c противоположного току I_g (рис.2.5) направления.

Поле с индукцией B_c также как и поле с индукцией B_g считаем распределенным в воздушном зазоре вдоль окружности статора по синусоидальному закону (рис.2.8).

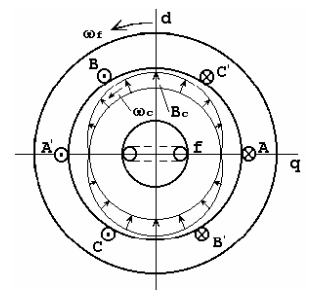


Рис. 2.8

3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Синхронный генератор предназначен для преобразования вводимой через вал его ротора механической энергии в электрическую.

Для того, чтобы генератор работая устойчиво, т.е. вращаясь с постоянной скоростью $\omega_f = \omega_c$, осуществляя преобразование механической энергии в электрическую, необходимо чтобы механический момент его турбины M_t совершал работу по преодолению равного и встречно направленного ему момента M . В противном случае - при отсутствии баланса моментов M_t и M генератор будет увеличивать либо уменьшать свою кинетическую энергию (увеличивать либо уменьшать скорость ω_f), что чревато потерей устойчивости.

В синхронном генераторе момент M имеет электромагнитную природу, почему и получил название электромагнитного. Его появление и действие обеспечивается соответствующей конструкцией генератора, в максимальной степени учитывающей проявление открытого Ампером объективного закона природы. Согласно этому закону на проводник с током в магнитном поле действует сила, пропорциональная силе тока в проводнике, индукции магнитного поля и синусу угла между направлениями линий индукции и проводником. Направление действующей на проводник силы определяется по правилу левой руки: линии магнитной индукции должны входить в ладонь, четыре вытянутых пальца должны быть вытянуты вдоль проводника по направлению тока, тогда вытяну-

тый большой палец будет показывать направление действия силы. В принятой модели генератора роль проводника с током выполняют расположенные вдоль оси вращения активные части обмотки возбуждения, а роль магнитного поля - поле в воздушном зазоре генератора, а точнее, его часть с индукцией B_c , определяемая работой генератора Γ_c . Другие же части магнитного поля с индукциями B_f и B_g при принятых допущениях исключаются из рассмотрения, так как при любом положении ротора в пространстве жестко связанные с ним активные части обмотки возбуждения всегда расположены в зоне, где индукции B_f и B_g равны нулю и следовательно не могут влиять на величину электромагнитного момента (рис.2.6). В генераторах специального назначения, где поле возбуждения создается постоянными магнитами, роль проводников с током выполняют движущиеся по орбитам в атомах ферромагнетиков электроны с неспаренными спинами.

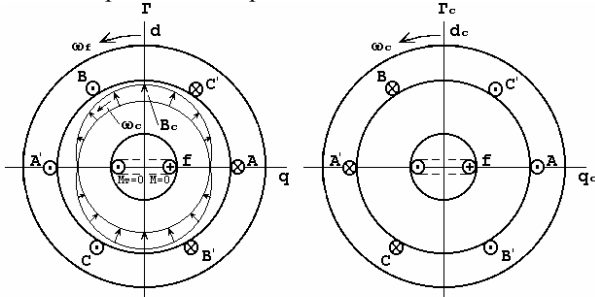


Рис. 3.1

тально на ротор генератора, в котором жестко закреплены эти части обмотки возбуждения, не действует электромагнитный момент. В этом режиме при пренебрежении потерями на трение не требуется наличия момента турбины и генератор работает как синхронный компенсатор: при токе обмотки возбуждения менее (более) определенной величины потребляет (выдает) реактивную мощность, не развивая активной мощности.

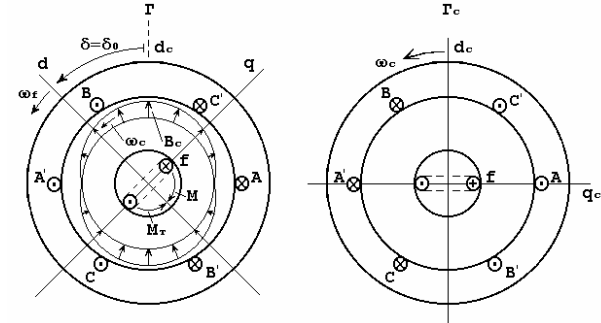


Рис. 3.2

продольными осями d и d_c .

По мере опережения ротором генератора Γ ротора генератора Γ_c (увеличения угла δ) активные части обмотки возбуждения генератора Γ входят во все более сильное поле B_c , определяя тем самым увеличение действующего на ротор генератора Γ электромагнитного момента M . При определенном угле δ_0 моменты M_t и M выравниваются, но за счет инерции ротор генератора Γ продолжает свое движение относительно ротора генератора Γ_c , сопровождаемое увеличением угла δ . Однако при углах больших δ_0 электромагнитный момент M преобладает над моментом турбины M_t и ротор генератора Γ тормозится относительно ротора генератора Γ_c . При угле δ_m скорости ω_f и ω_c генераторов Γ и Γ_c выравниваются, после чего при продолжающемся торможении угол δ уменьшается. При угле δ_0 моменты M и M_t вновь равны, но за счет инерции ротор генератора Γ продолжает свое движение, сопровождаемое уменьшением угла δ . Так продолжается до момента выравнивания скоростей ω_f и ω_c роторов генераторов, после чего снова начинается увеличение угла δ . Налицо колебательный характер переходного процесса, который успешно завершится при занятии ротором генератора Γ положения, определяемого углом δ_0 (рис.3.2).

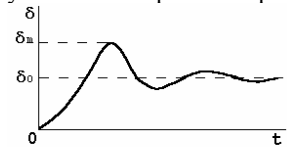


Рис. 3.3

Описанный характер изменения угла δ в переходном процессе в предположении быстрого изменения момента M_t турбины приведен на рис.3.3.

В положении ротора генератора Γ , определенном углом δ_0 , моменты M_t и M турбины T и генератора Γ равны, равны и скорости ω_f и ω_c вращения роторов генераторов Γ и Γ_c . Генератор Γ работает устойчиво и развивает при этом пропорциональную электромагнитному моменту M активную мощность P_g , передаваемую в приемную систему C . Из проведенных рассуждений ясно, что для изменения развиваемой генератором активной мощности необходимо изменить его электромагнитный момент M , что возможно сделать только изменив момент M_t вращающей генератор Γ турбины, который, в свою очередь, может быть изменен только путем изменения расхода поступающего в турбину энергоносителя (пара, воды, газа). Изменением же тока в обмотке возбуждения генератора Γ можно достичь лишь изменения положения его ротора в пространстве (угла δ_0), ЭДС E_g , и связанной с этим реактивной мощности генератора без изменения электромагнитного момента M и следовательно развиваемой им активной мощности.

Предположим, что в исходном режиме генератор вращается со скоростью $\omega_f = \omega_c$ и его продольная ось ориентирована аналогично продольной оси d_c генератора Γ_c (рис.3.1).

На рис.3.1 не показаны магнитные поля с индукциями B_f и B_g , как не влияющие на электромагнитный момент при принятых допущениях.

Как видно из рис.3.1 активные части обмотки возбуждения генератора Γ в любой момент времени располагаются в зоне, где магнитное поле отсутствует. Поэтому на эти части не действует электромагнитная сила, следовательно на ротор генератора, в котором жестко закреплены эти части обмотки возбуждения, не действует электромагнитный момент.

В этом режиме при пренебрежении потерями на трение не требуется наличия момента турбины и генератор работает как синхронный компенсатор: при токе обмотки возбуждения менее (более) определенной величины потребляет (выдает) реактивную мощность, не развивая активной мощности.

При подаче энергоносителя, например, пара в турбину генератора появляется механический момент M_t , под действием которого ротор генератора ускоряется и его скорость ω_f становится больше скорости ω_c генератора Γ_c . В результате активные части обмотки возбуждения генератора Γ , обгоняя магнитное поле с индукцией B_c , входят в зону его действия, и на них начинает действовать тормозящая электромагнитная сила, а на ротор - электромагнитный момент M (рис.3.2).

Здесь, как и на рис.3.1, не показано магнитных индукций B_f и B_g , не участвующих в создании электромагнитного момента M ; взаимное положение в пространстве роторов генераторов Γ и Γ_c определено углом δ между их

Следует заметить, что переходный процесс, связанный с изменением развиваемой генератором Γ активной и/или реактивной мощности всегда сопровождается механическим перемещением его ротора по отношению к ротору генератора G_c , и поэтому носит электромеханический характер. Механические перемещения ротора существенно замедляют переходный процесс, что усложняет решение задачи повышения устойчивости генератора Γ путем ускорения протекания переходного процесса с помощью систем автоматического регулирования. Это, в частности, явилось причиной того, что интенсивно разрабатываются и внедряются в практику наряду с традиционными синхронными и асинхронизированные турбогенераторы, в которых за счет наличия дополнительной обмотки возбуждения на роторе удается обеспечивать протекание переходных процессов без механического перемещения ротора, т.е. носящих сугубо электромагнитный характер.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

При объяснении и расчете протекающих в электрических системах электромеханических процессов с успехом можно использовать характеристики электромагнитного момента и активной мощности генератора, в дальнейшем просто характеристики момента и мощности генератора, которые представляют зависимости развиваемых генератором электромагнитного момента и активной мощности от пространственного положения его ротора по отношению к ротору другого параллельно работающего с ним генератора, определяемого углом между продольными осями этих генераторов. Применительно к генератору Γ , работающему в составе электрической системы (рис.2.1), его характеристикой момента (мощности) является зависимость развиваемого им момента M (активной мощности P) от угла δ .

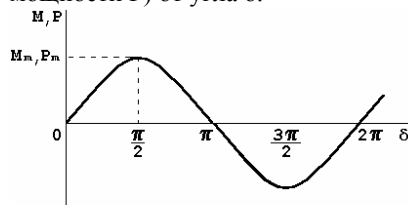


Рис. 4.1

и о синусоидальном характере зависимости электромагнитного момента M , а следовательно и развиваемой генератором Γ активной мощности P от угла δ (рис.4.1).

Собственно характеристикой момента (мощности) генератора Γ является часть изображенной на рис.4.1 зависимости, ограниченная углом $\delta=\pi$. Другая часть этой зависимости, соответствующая углам δ от π до 2π , является характеристикой момента (мощности) синхронного двигателя.

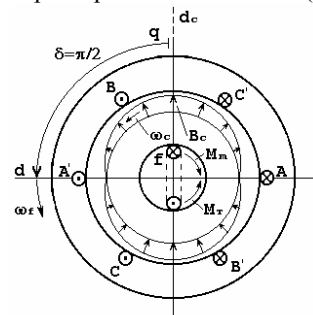


Рис. 4.2

При положении ротора генератора Γ , соответствующем углу $\delta=\pi/2$ (рис.4.2), активные части его обмотки возбуждения находятся в наиболее сильном поле B_c , на ротор при этом действует электромагнитный момент M наибольшей величины и генератор Γ развивает максимально возможную активную мощность P_m (рис.4.1), которая при принятых допущениях получила название идеального предела мощности генератора.

С учетом сказанного характеристику мощности генератора можно представить аналитически в виде

$$P = P_m \sin \delta \quad (4.1)$$

Следует помнить, что генератор не в состоянии развить активную мощность больше предела P_m , какую бы мощность не развивала при этом вращающаяся его турбина. Другое дело, что на практике должно обеспечиваться условие превышения предела мощности P_m над максимальной мощностью, которую может развить турбина.

Ранее было показано, что развиваемая генератором активная мощность P прямопропорциональна развиваемому им электромагнитному моменту M , который, в свою очередь, с одной стороны, прямопропорционален току в обмотке возбуждения или ему пропорциональной ЭДС E_g , с другой стороны, прямопропорционален индукции B_c магнитного поля или ей пропорциональному току I_c , определяемому из схемы замещения (рис.2.7) как отношение напряжения U_c на шинах приемной системы к индуктивному сопротивлению x . Все это позволяет рассчитывать предел мощности P_m генератора по выражению

$$P_m = k E_g (U_c / x), \quad (4.2)$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от единиц измерения, входящих в выражение величин.

Подставляя значение предела мощности P_m из выражения (4.2) в выражение (4.1) и учитывая величины в системе СИ (коэффициент $k=1$) выражение для характеристики мощности генератора Γ приводим к виду

$$P = E_g (U_c / x) \sin \delta. \quad (4.3)$$

В заключение следует подчеркнуть, что характеристика мощности генератора показывает только лишь способность генератора развить ту или иную мощность. Мощность же, развиваемая генератором в стационарном режиме, всецело определяется мощностью вращающей генератор турбины.

5. ПОНЯТИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Расширим ранее введенное понятие статической устойчивости электрической системы с учетом проведенных рассуждений.

Будем считать, что в турбину Т генератора Г (рис.2.1) поступает в единицу времени неизменное количество энергоносителя, например, пара, что определяет постоянство развиваемых турбиной момента $M_T = M_0$ и активной мощности $P_T = P_0$, в том числе, и независимость их от угла δ (рис.5.1).

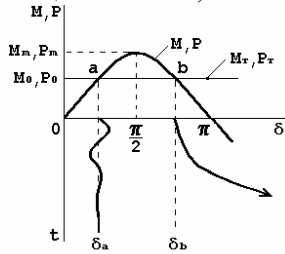


Рис. 5.1

Как отмечалось, нормальный (устойчивый) режим работы генератора в системе возможен при балансе механического и электромагнитного моментов M_T и M турбины и генератора, или, что тоже самое, при балансе развиваемых турбиной и генератором мощностей P_T и P . Формально такой режим может существовать при значениях углов δ_a и δ_b , соответствующих точкам а и б пересечения характеристик момента (мощности) турбины и генератора (рис.5.1).

При малом возмущении режима, соответствующего точке а, появившееся отклонение угла δ от значения δ_a будет с течением времени затухать через колебательный переходный процесс (рис.5.1), так как на валу генератора и турбины при $\delta \neq \delta_a$ появляется результирующий момент, стремящийся приблизить угол δ к значению δ_a . Так в случае $\delta > \delta_a$ результирующий момент носит тормозящий характер ($M_T < M$) и приводит к уменьшению угла δ , а при $\delta < \delta_a$ - ускоряющий ($M_T > M$) и приводит к увеличению угла δ . В результате генератор возвращается в нормальный режим работы, характеризуемый углом $\delta = \delta_a$, что и доказывает обладание генератором статической устойчивости.

При малом же возмущении режима, соответствующего точке б, появившееся отклонение угла δ от значения δ_b в конечном счете с течением времени будет прогрессивно возрастать (рис.5.1), так как на валу генератора и турбины при $\delta > \delta_b$ появляется момент ускоряющего характера ($M_T > M$), стремящийся еще больше увеличить это отклонение, а следовательно увеличить и угол δ . В результате генератор не возвращается в нормальный режим работы, характеризуемый углом $\delta = \delta_b$, и потому такой режим не может быть признан статически устойчивым.

Из проведенных рассуждений вытекает формальный прямой критерий статической устойчивости генератора и системы в целом, заключающийся в необходимости выполнения условия

$$dP / d\delta > 0. \quad (5.1)$$

Это условие выполняется при $P_0 < P_m$, имеющим место при углах $\delta < \pi/2$.

Степень статической устойчивости генератора характеризуется коэффициентом запаса статической устойчивости, который рассчитывается по выражению

$$K_c = (P_m - P_0) 100 / P_0, \% \quad (5.2)$$

Рассчитать статическую устойчивость - это значит определить условия при которых она обеспечивается, в частности, для генератора Г - определить предел мощности P_m и допустимое значение коэффициента запаса K_c .

Действующие нормы устанавливают необходимый коэффициент запаса K_c для нормальных режимов равным 20%, для послеаварийных режимов 8%.

6. ПОНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Статическая устойчивость является необходимым условием существования нормального режима электрической системы, но не предопределяет ее способность продолжить работу при резких нарушениях режима. Эта сторона проблемы, как отмечалось выше, затрагивает круг вопросов, относящихся к динамической устойчивости. Расширим представления о последней с учетом проведенных рассуждений.

В качестве причины, приводящей к резкому нарушению режима электрической системы (рис.2.1), рассмотрим отключение одной цепи линии Л. Схема замещения электрической системы для этого случая приведена на рис.6.1.

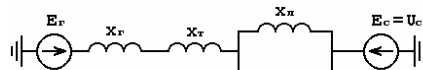


Рис. 6.1

Отключение одной цепи линии Л означает увеличение как ее сопротивления, так и результирующего сопротивления X в схеме замещения (рис.2.3). Это уменьшает возможные значения тока I_s , определяемой им индукции ψ_s магнитного поля и зависящий от последнего электромагнитный момент генератора. Такое снижение возможностей генератора по созданию электромагнитного момента отражается характеристикой момента M_{II} , располагающейся ниже характеристики момента M_I исходного режима (рис.6.2).

Предположим, что в исходном режиме (точка а) турбина создает момент M_{01} (рис.6.2а). При отключении цепи линии Л угол δ из-за инерционности ротора генератора сразу не изменится, а вот электромагнитный момент мгновенно снизится до значения M_b , которое определяется точкой б на характеристике момента M_{II} и меньше неизменного и вращающего момента турбины $M_T = M_{01}$. Это вызовет ускорение ротора генератора, увеличение его скорости, и как следствие прогрессирующий рост угла δ (рис.6.2а). Процесс увеличения скорости ротора закон-

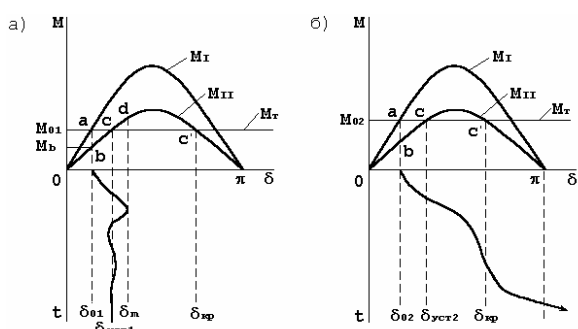


Рис. 6.2

бательность процесса объясняется как механической инерционностью ротора генератора, так и возникновением при неравенстве $\delta \neq \text{дуст}$ результирующего момента на валу генератора, стремящегося приблизить угол δ к значению дуст. В результате установится новый нормальный режим работы генератора и системы в целом. В этом случае можно говорить об обладании генератором и системой динамической устойчивости при отключении цепи линии Л.

Если же скорость ω ротора генератора при торможении не успеет сравниться с синхронной ω_c , то есть угол δ достигнет критического значения $\delta_{кр}$, соответствующего точке c' пересечения характеристик момента турбины и генератора (рис.6.2), то с этого момента режим уменьшения скорости генератора сменится режимом ее увеличения из-за преобладания при $\delta > \delta_{кр}$ вращающего момента турбины M_t над тормозящим электромагнитным моментом M_{II} генератора. Это вызовет прогрессирующий рост угла δ (рис.6.2б) и последующее его непрерывное увеличение, то есть проворачивание ротора генератора Γ относительно ротора генератора Γ_c приемной системы, означающее нарушение устойчивости. Такое развитие процесса возможно, например, если в момент отключения линии Л генератор развивал большую активную мощность, то есть его турбина создавала момент $M_{02} > M_{01}$, и на этапе торможения ротора генератора (между точками s и c' пересечения характеристик моментов) действующий на него результирующий момент был недостаточен для снижения его скорости до синхронной. В этом случае можно говорить об отсутствии динамической устойчивости у генератора и системы в целом при отключении цепи линии Л.

Рассчитать динамическую устойчивость - это значит определить условия, при которых она обеспечивается, в частности, в рассмотренном случае для генератора Γ , это значит определить, например, ту предельную мощность, развивая которую генератор сохранит устойчивость при отключении одной цепи линии Л.

7. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ

Из проведенных рассуждений явствует, что генератор Γ и электрическая система в целом будут более устойчивыми при большем значении амплитуды M_m характеристики электромагнитного момента генератора (рис.4.1). Поэтому влияние каждого из параметров системы на ее устойчивость будем оценивать через его влияние на эту характеристику и амплитуду M_m .

7.1. Влияние продольного индуктивного сопротивления

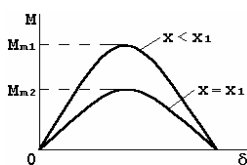


Рис. 7.1

Меньшее по величине индуктивное сопротивление x (рис.2.3) в меньшей степени ограничивает ток I_c (рис.2.7), который создает в воздушном зазоре генератора магнитное поле с большей индукцией B_c . Влияние последнего на обмотку возбуждения приводит к возникновению большего электромагнитного момента, в том числе, и его максимального значения M_m , и благоприятно сказывается на устойчивости генератора. На рис.7.1 приведены характеристики момента генератора для двух значений сопротивления x .

На практике снижения сопротивления x обычно добиваются: увеличением числа параллельных цепей линии электропередачи; увеличением рабочего напряжения линии электропередачи, приводящим к снижению ее сопротивления, приведенного к ступени генераторного напряжения; включением батареи конденсаторов в рассечку линии электропередачи, частично компенсирующей своим емкостным сопротивлением сопротивление x .

7.2. Влияние активных сопротивлений элементов

Снимем ранее принятое допущение о неучете активных сопротивлений элементов электрической системы (рис.2.1). Тогда схемы замещения (рис.2.3, 2.5, 2.7) примут вид, представленный соответственно на рис.7.2а,б,в.

Учет активного сопротивления r в схемах замещения делает их менее инерционными электрическими цепями в электромагнитном отношении. Поэтому отставание по фазе тока I_r (I_c) от порождающей его ЭДС E_r (E_c) составляет угол уже меньший $\pi/2$ на величину α , зависящую от отношения сопротивлений x и r . Поэтому и магнит-

ные поля с индукцией B_f и B_g (B_c) уже не противофазны (синфазны), как это было показано на рис.2.6(2.7), а смещены друг относительно друга на угол $\pi - \alpha$ (рис.7.3).

В результате с одной стороны активные части части обмотки возбуждения генератора постоянно находятся в зоне, где индукция B_g отлична от нуля, и следовательно на них действует электромагнитная сила, а на ротор тормозящий электромагнитный момент M , не зависящий от положения ротора в пространстве (угла δ). Причем этот момент тем больше, чем больше угол α , то есть меньше отношение x/r . С другой стороны, активные части обмотки возбуждения уже при угле $\delta=0$ находятся в зоне, где индукция поля B_c отлична от нуля, и следовательно на них действует электромагнитная сила, а на ротор ускоряющий электромагнитный момент M_c , как ранее было показано синусоидально зависящий от угла δ . Характеристики электромагнитного момента генератора M и его составляющих M_g и M_c приведены на рис.7.4.

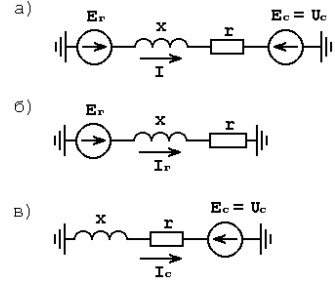


Рис. 7.2

В реальной электрической системе отношение $x/r > 5$, поэтому учет активного сопротивления r приводит к весьма незначительному увеличению полного сопротивления цепи $z = (x^2 + r^2)^{1/2}$ (рис.7.2в), уменьшению тока I_c , индукции B_c и момента M_c . Это уменьшение момента M_c с лихвой компенсируется появлением дополнительного момента M_g . И в целом результирующий момент M генератора при учете активных сопротивлений элементов будет больше, чем при их неучете. Однако это превышение будет не таким большим, чтобы можно было говорить о решающем влиянии на увеличение устойчивости системы. Скорее это позволяет практические расчеты устойчивости проводить без учета активных сопротивлений элементов электрической системы.

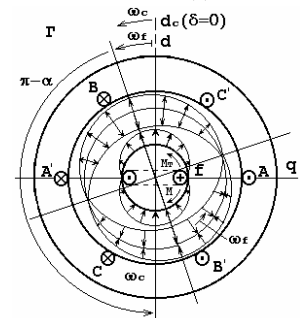


Рис. 7.3

В реальной электрической системе отношение $x/r > 5$, поэтому учет активного сопротивления r приводит к весьма незначительному увеличению полного сопротивления цепи $z = (x^2 + r^2)^{1/2}$ (рис.7.2в), уменьшению тока I_c , индукции B_c и момента M_c . Это уменьшение момента M_c с лихвой компенсируется появлением дополнительного момента M_g . И в целом результирующий момент M генератора при учете активных сопротивлений элементов будет больше, чем при их неучете. Однако это превышение будет не таким большим, чтобы можно было говорить о решающем влиянии на увеличение устойчивости системы. Скорее это позволяет практические расчеты устойчивости проводить без учета активных сопротивлений элементов электрической системы.

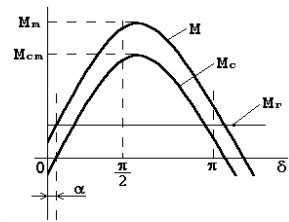


Рис. 7.4

7.3. Влияние шунтирующего индуктивного сопротивления

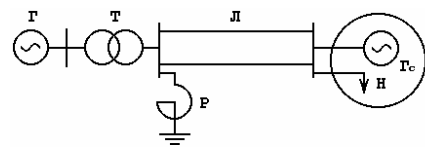


Рис. 7.5

В схеме (рис.2.1) с целью компенсации избытка реактивной мощности в электрической системе и связанного с этим повышения напряжения может быть включен шунтирующий реактор P (рис.7.5) с индуктивным сопротивлением x_p .

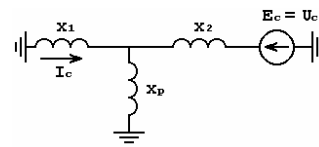


Рис. 7.6

Включение реактора P трансформирует и схему замещения (рис.2.7) к виду, представленному на рис.7.6. Здесь $x_1 = x_g + x_t$; $x_2 = x_l/2$.

Сопротивление x_p шунтирует сопротивление x_2 и приводит к снижению тока I_c , индукции B_c магнитного поля в зазоре генератора и, как следствие, к уменьшению его электромагнитного момента. Характеристики электромагнитного момента генератора при включенном ($x_p \neq 0$) и отключенном ($x_p = \infty$) реакторе приведены на рис.7.7.

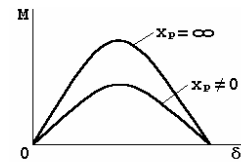


Рис. 7.7

Таким образом наличие шунтирующего сопротивления снижает устойчивость генератора и электрической системы в целом.

7.4. Влияние шунтирующего емкостного сопротивления

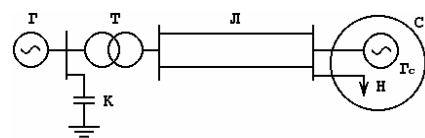


Рис. 7.8

В электрической системе (рис.2.1) с целью компенсации недостатка реактивной мощности и связанного с этим снижения напряжения в ее узловых точках может быть включено устройство поперечной компенсации (УПК) реактивной мощности, например, в виде батареи статических конденсаторов (рис.7.8) с емкостным сопротивлением x_k .

Включение батареи конденсаторов приводит схему замещения (рис.2.7) к виду, представленному на рис.7.9. Здесь $x_1 = x_g$; $x_2 = x_l + x_k/2$.

Включение конденсаторов K с сопротивлением большим резонансного $x_k > x_1 x_2 / (x_1 + x_2)$ за счет генерации в них дополнительного реактивного тока приводит к увеличению тока I_c . Это, в свою очередь, приводит к увеличению индукции B_c магнитного поля в воздушном зазоре генератора, и, как следствие, к увеличению его электромагнитного момента. Характеристики электромагнитного момента генератора при включенной ($x_k \neq 0$) и отключенной ($x_k = \infty$) батарее конденсаторов K приведены на рис.7.10.

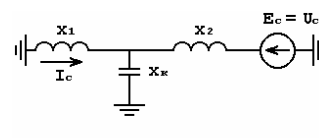


Рис. 7.9

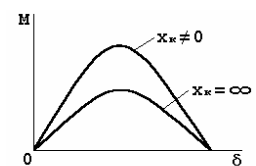


Рис. 7.10

Таким образом включение шунтирующего емкостного сопротивления благотворно сказывается на устойчивости генератора и системы в целом.

7.5. Влияние промежуточного отбора мощности



Рис. 7.11

Рассмотрим так называемую сложную связь генератора Г с приемной системой С, когда на пути передачи развиваемой генератором мощности имеется ее отбор, например, для потребителей П, питающихся с генераторного напряжения (рис.7.11).

Будем учитывать активные сопротивления входящих в систему элементов, нагрузку потребителей П считать активно-индуктивной и учитывать ее в схеме замещения системы (рис.7.12) постоянным сопротивлением z_3 .

Здесь $z_1 = r_1 + jx_1$ - сопротивление генератора Г; $z_2 = r_2 + jx_2$ - суммарное сопротивление трансформатора Т и линии Л; $z_3 = r_3 + jx_3$ - сопротивление потребителей.

При включении потребителей их сопротивление z_3 шунтирует сопротивление z_1 и тем самым уменьшает ток I в статорных обмотках генератора, а значит индукции B_g и B_c магнитных полей в его воздушном зазоре и зависящий от последних электромагнитный момент. Характеристики электромагнитного момента генератора при включенных ($z_3 \neq 0$) и отключенных ($z_3 = \infty$) потребителей П приведены на рис.7.13.

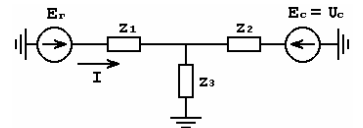


Рис. 7.12

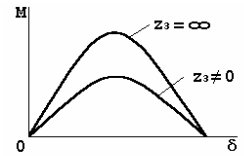


Рис. 7.13

Из вышесказанного следует вывод об отрицательном влиянии на устойчивость промежуточного отбора мощности при ее передаче от генератора в приемную систему.

Для качественной оценки этого влияния удобно пользоваться характеристикой мощности генератора в аналитической форме, которую получим из следующих рассуждений.

Как и в разделе 2 режим системы (рис.7.11) разделим на два. Первый - учитывает действие только ЭДС E_g генератора. Схема замещения для него представлена на рис.7.14.

Активная мощность P_g , развиваемая генератором в этом режиме, носит название собственной и согласно закону Ампера прямопропорциональна, с одной стороны, току возбуждения, а значит и пропорциональной ему ЭДС E_g генератора, с другой стороны, индукции B_g магнитного поля, в котором находятся активные части обмотки возбуждения, а значит и току I_g , порождающему это поле. Ток I_g определяется из схемы замещения (рис.7.14) по выражению

$$I_g = (E_g / z_{11}) \sin \alpha_{11}, \quad (7.1)$$

где z_{11} - модуль собственного сопротивления первой ветви схемы (рис.7.14), определяемого по выражению

$$z_{11} = r_{11} + jx_{11} = z_1 + z_2 z_3 / (z_2 + z_3), \quad (7.2)$$

$$\alpha_{11} = \pi/2 - \arctg (x_{11} / r_{11}) \quad (7.3)$$

- дополнительный угол сопротивления z_{11} , аналогичный по смыслу углу α , введенному в параграфе 7.2.

С учетом сказанного и представлении величин в системе СИ собственная активная мощность генератора рассчитывается по выражению

$$P_g = (E_g^2 / z_{11}) \sin \alpha_{11}, \quad \text{или} \quad (7.4)$$

$$P_g = E_g^2 y_{11} \sin \alpha_{11}, \quad \text{где} \quad (7.5)$$

$$y_{11} = 1 / z_{11} \quad (7.6)$$

- собственная проводимость первой ветви.

Схема замещения для второго режима, учитывающего действие только ЭДС $E_c = U_c$, приведена на рис.7.15.

Активная мощность P_c , развиваемая генератором в этом режиме, носит название взаимной и как и в первом режиме прямопропорциональна ЭДС E_c генератора и току I_c . Ток I_c определяется из схемы замещения (рис.7.15) по выражению

$$I_c = (U_c / z_{12}) \sin(\delta - \alpha_{12}), \quad (7.7)$$

где z_{12} - модуль взаимного сопротивления между первой и второй ветвями схемы (рис.7.15), определяемого по выражению

$$z_{12} = r_{12} + jx_{12} = z_1 + z_2 + (z_1 z_2 / z_3), \quad (7.8)$$

$$\alpha_{12} = \pi/2 - \arctg (x_{12} / r_{12}), \quad (7.9)$$

- дополнительный угол сопротивления z_{12} , аналогичный по смыслу углу α .

С учетом сказанного при представлении величин в системе СИ взаимная активная мощность генератора рассчитывается по выражению

$$P_c = (E_g U_c / z_{12}) \sin(\delta - \alpha_{12}) \quad \text{или} \quad (7.10)$$

$$P_c = E_g U_c y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}), \quad \text{где} \quad (7.11)$$

$$y_{12} = 1 / z_{12}, \quad (7.12)$$

- взаимная проводимость между первой и второй ветвями.

Полная активная мощность генератора складывается из мощностей P_g и P_c первого и второго режима и рассчитывается по выражению

$$P = P_g + P_c = E_g^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_g U_c y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}). \quad (7.13)$$

Это выражение и представляет искомую аналитическую форму характеристики мощности генератора. С ее помощью, в частности, можно проверить полученные выше выводы качественного анализа влияния параметров системы на ее устойчивость.

8. ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ

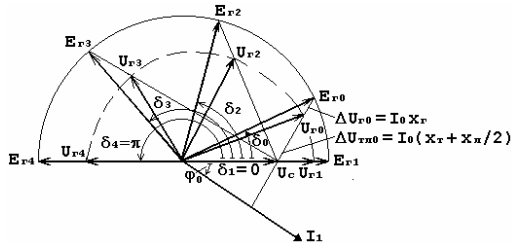


Рис. 8.1

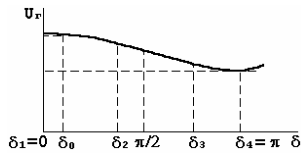


Рис. 8.2

$x_{л/2}$), и это имеет место в любом режиме. В другом режиме с меньшей или большей чем в исходном развиваемой генератором активной мощностью, характеризуемом соответственно углом, например, δ_1 или δ_2 (δ_3 , δ_4), вектор ЭДС E_g , не изменившись по величине, займет новое положение. Новое положение займет и вектор U_g , но его величина изменится. Причем с увеличением активной нагрузки генератора (угла δ) напряжение U_g снижается. Характер изменения напряжения U_g от величины угла δ , вытекающий из векторной диаграммы (рис.8.1), приведен на рис.8.2.

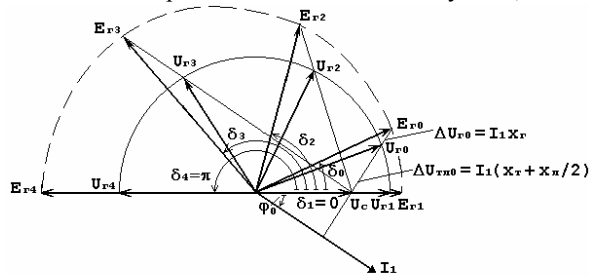


Рис. 8.3

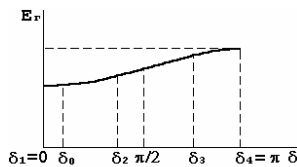


Рис. 8.4

Следует отметить наибольшую скорость увеличения ЭДС генератора с увеличением его активной нагрузки (угла δ) при угле $\delta = \pi/2$. Считая генератор Γ в схеме (рис.2.1), снабженным АРВ, рассмотрим влияние последнего на устойчивость.

8.1. Характеристика момента (мощности) регулируемого генератора

В отличие от характеристики момента(мощности) нерегулируемого генератора, представляющей собой синусоиду (рис.4.1), характеристика момента (мощности) генератора с АРВ имеет более сложный характер, отражающий непрерывное изменение ЭДС E_g генератора. Получим ее (рис.8.5) путем соединения точек на предварительно построенных при различных значениях ЭДС E_g характеристиках момента (мощности) нерегулируемого генератора, точек соответствующих углам δ , вытекающим из векторной диаграммы (рис.8.3).

До сих пор предполагалось, что ЭДС E_g генератора Γ (рис.2.1) при изменении режима остается постоянной. Посмотрим, что происходит с напряжением U_g на шинах генератора при увеличении развиваемой им активной мощности или при увеличении связанного с этим угла δ . Значение напряжения U_g можно получить из векторной диаграммы (рис.8.1), характеризующей режим схемы замещения (рис.2.2).

Так в исходном режиме при выдаче генератором активной и реактивной мощностей и характеризуемом углами φ и δ_0 , значение напряжения U_g получается прибавлением к вектору напряжения U_c на шинах приемной системы C падения напряжения $\Delta U_{т0}$ в суммарном сопротивлении ($x_{т} + x_{л}/2$) трансформатора T и линии L . Прибавляя далее к вектору $U_{г0}$ падение напряжения $\Delta U_{г0}$ в индуктивном сопротивлении $x_{г}$ генератора находим ЭДС $E_{г0}$ в исходном режиме. Характерно, что конец вектора напряжения $U_{г0}$ делит вектор полного падения напряжения ($\Delta U_{г0} + \Delta U_{т0}$) на два отрезка: $\Delta U_{г}$ и $\Delta U_{тл}$ - в отношении величин сопротивлений $x_{г}$ и ($x_{т} +$

Следует заметить, что скорость снижения напряжения U_g генератора с увеличением его активной нагрузки (угла δ) неодинакова и максимальна при угле $\delta = \pi/2$.

С целью недопущения колебания напряжения генератора U_g при изменении активной нагрузки, генераторы снабжаются автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ). АРВ, реагируя на отклонение напряжения генератора U_g от требуемого значения, изменяет ток возбуждения генератора, а с ним и его ЭДС E_g до тех пор, пока не восстановится это требуемое значение напряжения.

Значение ЭДС $E_{г0}$, которое будет в исходном режиме при угле $\delta = \delta_0$ или любом другом, можно получить из векторной диаграммы (рис.8.3), характеризующей режим схемы замещения (рис.2.2) и построенной по тем же правилам, что и диаграмма на рис.8.1, но при условии постоянства напряжения U_g в исходном режиме.

Характер изменения ЭДС E_g регулируемого генератора от величины угла δ , вытекающий из векторной диаграммы (рис.8.3), приведен на рис.8.4.

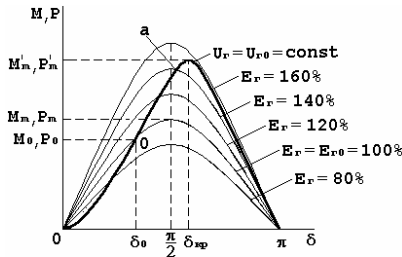


Рис. 8.5

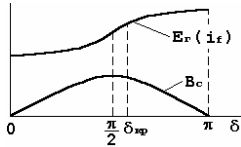


Рис. 8.6

Характеристику момента (мощности) регулируемого генератора от нерегулируемого с точки зрения обеспечения устойчивости выгодно отличает ее значительно большая амплитуда $Mm'(Pm')$ в сравнении с амплитудой $Mm(Pm)$, что прежде всего определяет больший коэффициент запаса статической устойчивости. Максимум характеристики достигается не при $\delta = \pi/2$ как у нерегулируемого генератора, а при $\delta = \delta_{кр} > \pi/2$. Это объясняется тем, что при увеличении угла δ от $\pi/2$ до $\delta_{кр}$ скорость увеличения ЭДС E_g , а следовательно и тока возбуждения преобладает над скоростью уменьшения индукции ψ_c магнитного поля в котором перемещается обмотка возбуждения (рис.8.6), что и определяет увеличение электромагнитного момента M .

Если бы АРВ обладал абсолютной чувствительностью и ток возбуждения генератора изменялся бы без всякого запаздывания, то момент (мощность) генератора изменялся (изменялась) бы при любых изменениях угла δ в соответствии с характеристикой (рис.8.5) при постоянстве напряжения U_g на выводах генератора, и можно было бы за предельный считать режим, соответствующий углу $\delta_{кр}$. Однако неизбежное запаздывание в изменении тока возбуждения генератора, а также запаздывание в изменении токов в цепях самого АРВ вызывает изменение момента (мощности) генератора по отличному от характеристики (рис.8.5) закону. Определим этот закон при небольшом возмущении исходного режима работы генератора, отвечающего, например, точке а на характеристике момента (рис.8.5) при постоянстве напряжения U_g . Увеличение угла δ обуславливает уменьшение напряжения U_g на выводах генератора. АРВ повышает напряжение на обмотке возбуждения генератора, но ток в ней возрастает не сразу, а замедленно, поскольку индуктивность обмотки возбуждения весьма велика. Поэтому изменение электромагнитного момента генератора (рис.8.7) в первый момент времени следует характеристике момента при постоянстве ЭДС E_g генератора, соответствующей точке а. Момент генератора снижается, и под влиянием избытка момента турбины угол δ продолжает возрастать. Однако ток возбуждения и ЭДС E_g генератора также начинают возрастать и режим переходит с одной характеристики момента на другую, что не только замедляет снижение момента генератора, но в дальнейшем с ростом угла δ приводит к его увеличению. В точке б избыток момента исчезает, но инерция ротора обуславливает дальнейшее увеличение угла δ , сопровождаемое ростом момента генератора. Избыток момента генератора затормаживает ротор, и в точке с достигается максимальное значение угла δ , после чего он начинает уменьшаться. После того как будет пройдена точка d, лежащая на характеристике момента, снятой при постоянстве напряжения U_g генератора, АРВ начинает уменьшать напряжение на обмотке возбуждения генератора и кривая изменения момента начинает пересекать семейство характеристик момента, снятых при постоянстве ЭДС E_g генератора, в обратном направлении в соответствии с уменьшением ЭДС E_g , достигая точки е на характеристике момента генератора, снятой при постоянстве напряжения U_g . На этом один цикл колебаний завершается. Далее процесс может идти двояко: после нескольких циклов колебания затухают, и устанавливается первоначальный режим работы в точке а (рис.8.7а); развиваются колебания с нарастающей амплитудой момента генератора и угла δ , приводящие к потере устойчивости генератором (рис.8.7б).

Пойдет процесс тем или иным путем зависит от параметров АРВ, причем при определенных их значениях генератор может быть статически неустойчив даже при углах $\delta < \pi/2$, где нерегулируемый генератор всегда статически устойчив.

8.2. Параметры АРВ генератора и их влияние на статическую устойчивость

Рассмотрим работающий на холостом ходу генератор, регулирование напряжение U_g которого осуществляется регулятором прямо пропорционально напряжению управления U_y (функциональная схема системы регулирования приведена на рис.8.8).

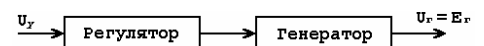


Рис. 8.8

$$U_g = K_y U_y, \quad (8.1)$$

где K_y - коэффициент пропорциональности (усиления).

В свою очередь, напряжение управления U_y прямопропорционально напряжению задания генератора $U_{гз}$

$$U_y = K_z U_{гз}, \quad (8.2)$$

где K_z - коэффициент пропорциональности.

Подставляя значение напряжения U_y из выражения (8.2) в выражение (8.1), приводим последнее к виду

$$U_g = K_u U_{гз}, \quad (8.3)$$

где коэффициент

$$K_U = K_U K_Z \quad (8.4)$$

будем называть в дальнейших рассуждениях статическим коэффициентом усиления по напряжению генератора. С учетом выражения (8.3) схему на рис.8.8 преобразуем к виду (рис.8.9).

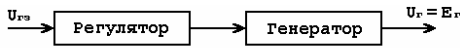


Рис.8.9

Система регулирования, функциональная схема которой приведена на рис.8.9, относится к разомкнутым системам регулирования, в которых имеет место воздействие регулятора на генератор, а обратного воздействия генератора на регулятор нет. Такие системы регулирования существовали на заре развития электроэнергетики. В настоящее же время применяются замкнутые системы регулирования, в которых имеется взаимное воздействие регулятора и генератора. Простейшим представителем такого семейства систем является система автоматического регулирования возбуждения пропорционального действия АРВ ПД с отрицательной обратной связью по напряжению генератора $U_{г}$. Эта система осуществляет регулирование по отклонению напряжения генератора от заданного значения $U_{гз}$ путем формирования регулирующего воздействия E , пропорционального этому отклонению. Функциональная схема системы приведена на рис.8.10.

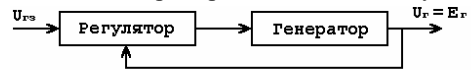


Рис.8.10

В этой системе, в отличие от изображенной на рис.8.9, на выходе регулятора формируется регулирующее воздействие, пропорциональное отклонению ϵ , поэтому, заменяя в выражении 8.3 значение напряжения $U_{гз}$ на отклонение ϵ , получаем

$$U_{г} = K_U \epsilon = K_U (U_{гз} - U_{г}) \quad (8.5)$$

или, что то же самое при работе генератора без нагрузки

$$E_{г} = K_U \epsilon = K_U (U_{гз} - U_{г}) . \quad (8.6)$$

Представляя ЭДС $E_{г}$ и напряжение $U_{г}$ в виде

$$E_{г} = E_{г0} + \Delta E_{г} , \quad (8.7)$$

$$U_{г} = U_{г0} + \Delta U_{г} , \quad (8.8)$$

где $E_{г0}$, $U_{г0}$ - значения ЭДС $E_{г}$ и напряжения $U_{г}$ в исходном стационарном режиме работы генератора, а $\Delta E_{г}$ и $\Delta U_{г}$ - отклонение ЭДС $E_{г}$ и напряжения $U_{г}$ от их значений в исходном режиме работы, и подставляя их в выражение (8.6), приводим последнее к виду

$$E_{г0} + \Delta E_{г} = K_U (U_{гз} - U_{г0}) - K_U \Delta U_{г} . \quad (8.9)$$

Так как в исходном режиме работы генератора

$$E_{г0} = K_U (U_{гз} - U_{г0}) , \quad (8.10)$$

то учитывая это в выражении (8.9), приводим последнее к виду

$$\Delta E_{г} = -K_U \Delta U_{г} . \quad (8.10)$$

Это выражение определяет закон пропорционального регулирования, из которого может быть определен статический коэффициент усиления по отклонению напряжения генератора

$$K_U = \Delta E_{г} / \Delta U_{г} , \quad (8.11)$$

определяющий величину принудительно производимого изменения ЭДС генератора $\Delta E_{г}$ при возникновении по какой либо причине отклонения напряжения генератора $\Delta U_{г}$.

Отклонение ϵ называется ошибкой регулирования и показывает на сколько отличается напряжение ненагруженного генератора от заданного значения. Так как напряжение такого генератора, определенное из выражения (8.5)

$$U_{г} = K_U U_{гз} / (1+K_U) , \quad (8.12)$$

то ошибка регулирования

$$\epsilon = U_{гз} - U_{г} = U_{гз} - K_U U_{гз} / (1+K_U) = U_{гз} / (1+K_U) . \quad (8.13)$$

Из последнего следует, что при большем коэффициенте усиления K_U напряжение генератора $U_{г}$ меньше отличается от заданного значения $U_{гз}$.

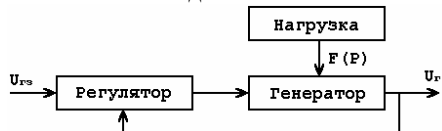


Рис.8.11

В случае работы генератора на сеть с нагрузкой функциональная схема системы АРВ ПД имеет, например, вид, представленный на рис.8.11.

В этом случае напряжение генератора

$$U_{г} = E_{г} - F(p) , \quad (8.14)$$

где $F(p)$ - величина снижения напряжения генератора при отдаваемой генератором нагрузке, например, активной мощности P . Эта величина, как было показано ранее, при увеличении мощности P генератора возрастает, а напряжение генератора в соответствии с выражением (8.14) снижается. При малом изменении режима баланс отклонений напряжения генератора $\Delta U_{г}$, ЭДС $\Delta E_{г}$ и величины $\Delta F(p)$ согласно выражению (8.14) примет вид

$$\Delta U_{г} = \Delta E_{г} - \Delta F(p) , \quad (8.15)$$

Подставляя в это выражение значение отклонения ЭДС $\Delta E_{г}$ из выражения (8.10) приводим его к виду

$$\Delta U_{г} = -K_U \Delta U_{г} - \Delta F(p) , \quad (8.16)$$

Из него находим установившееся отклонение напряжения генератора

$$\Delta U_{г} = \Delta F(p) / (1+K_U) . \quad (8.17)$$

Из последнего следует, что при большом коэффициенте усиления K_u и у нагруженного генератора снижены напряжения меньше. Это проиллюстрировано на рис.8.12.

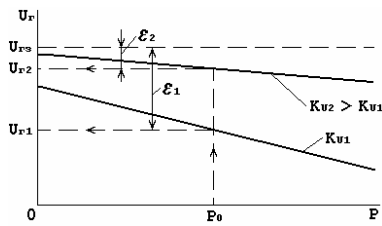


Рис. 8.12

В результате можно утверждать, что для приближения напряжения генератора к заданному значению и обеспечения большей степени поддержания его при колебаниях нагрузки следует увеличивать коэффициент усиления K_u . Считается достаточным иметь этот коэффициент равным 50. Тогда ошибка регулирования напряжения генератора будет составлять около 2%.

Сказанное выше справедливо для установившегося режима работы генератора в электрической системе. Посмотрим: можно ли утверждать аналогичное принимая во внимание и переходный процесс в генераторе. В качестве причины, приводящей к переходному процессу, рассмотрим, например, подключение в электрической системе дополнительной активной нагрузки. В случае отсутствия регулирования возбуждения генератора его напряжение U_g , как это было показано ранее, должно снизиться, например, с $U_{г3}$ до $U_{г1}$. Это снижение вызовет снижение электромагнитного момента генератора, то есть появление избыточного момента ΔM на его валу, под действием которого ротор генератора будет совершать колебательное движение на фоне его вращательного движения с постоянной скоростью.

Избыточный момент ΔM таков, что он стремится вернуть обладающий определенной массой ротор генератора в состояние равномерного вращательного движения. Согласно же законам механики движение ротора генератора при этом будет колебательным. Так как при таком движении будет изменяться положение ротора генератора по отношению к роторам генератора приемной системы (угол δ), то и переход напряжения генератора от $U_{г3}$ до $U_{г1}$ будет колебательным. Неминуемые же потери энергии в переходном процессе делают эти колебания затухающими. Сказанное проиллюстрировано диаграммой изменения напряжения генератора в переходном процессе, приведенной на рис.8.13а. По завершении переходного процесса напряжение генератора установится на уровне $U_{г0}=U_{г1}$. Применение же регулятора возбуждения (АРВ ПД), как это отмечалось ранее, приводит к тому, что новое установившееся напряжение генератора $U_{г0}$ имеет более высокий уровень (рис.8.13б), то есть происходит его меньшее снижение. Однако работа регулятора возбуждения приводит к появлению дополнительного электромагнитного момента ΔM_p генератора, стремящегося как избыточный момент ΔM вернуть генератор в состояние равномерного вращательного движения. Поэтому движение генератора в переходном процессе более быстрое, то есть колебания режимных параметров, включая и напряжение генератора, происходят с большей частотой (рис.8.13б).

Из-за инерционности элементов системы регулирования возбуждения имеет место неизбежное запаздывание в появлении и действии дополнительного момента ΔM_p генератора по отношению к избыточному моменту ΔM . Это означает, что в отличие от момента ΔM момент ΔM_p за период совершают отличную от нуля работу, увеличивающую энергию колебательной системы. В свою очередь, это затягивает связанный с потерями процесс вывода энергии из колебательной системы, то есть увеличивает время протекания переходного процесса в генераторе (рис.8.13б).

При пропорциональном регулировании возбуждения изменение ЭДС генератора напряжения ΔE_g пропорционально коэффициенту усиления K_u (выражение (8.10)), изменение же момента ΔM_p согласно закону Ампера пропорционально изменению тока возбуждения генератора, а следовательно и ЭДС ΔE_g . Поэтому изменение момента ΔM_p пропорционально коэффициенту усиления K_u . Следовательно с увеличением коэффициента усиления K_u увеличивается и момент ΔM_p . Последнее, как это было отмечено выше, означает увеличение частоты колебаний режимных параметров, что, в свою очередь, ведет к большему запаздыванию в действии момента ΔM_p и следовательно к увеличению закачиваемой при совершении им работы энергии в колебательную систему. При определенном максимально допустимом значении этого коэффициента усиления K_{umax} энергия, закачиваемая в систему за счет действия регулятора на каждом периоде колебаний, становится равной энергии потерь. Энергия системы при этом от периода к периоду не меняется, то есть колебания параметров носят незатухающий характер(рис.8.13в). При установке в регуляторе значения коэффициента усиления большего чем K_{umax} энергия, закачиваемая в систему за счет действия регулятора на каждом периоде колебаний, будет превышать энергию потерь, энергия системы от периода к периоду колебаний будет увеличиваться, поэтому будут увеличиваться амплитуда колебаний параметров, то есть система будет неустойчивой (рис.8.13г). Во избежание неустойчивости системы при применении АРВ ПД коэффициент усиления K_u в нем следует устанавливать не более значения K_{umax} , а при желании иметь небольшое время переходного процесса - и того меньше.

При большей развиваемой генератором активной мощности P АРВ ПД приходится обрабатывать большее отклонение напряжения генератора ΔU_g (рис.8.12). В результате при прочих равных условиях появляется больший момент ΔM_p , колебания будут происходить с большей частотой, будет большее запаздывание в действии момента ΔM_p и большее значение закачиваемой в систему энергии при совершении работы этим моментом. Это означает, что режим незатухающих колебаний системы будет наступать при меньшем значении K_{umax} . Поэтому во избежание нарушения устойчивости генератора при большой активной нагрузке следует в большей степени ограничивать значение коэффициента усиления K_u АРВ ПД. Это и проиллюстрировано на рис.8.14, где область ограничения кривой со стороны штриховки является областью допустимых значений коэффициента усиления K_u .

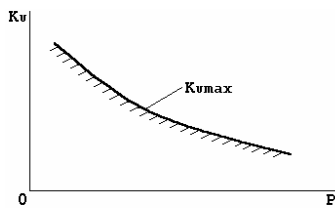


Рис. 8.14

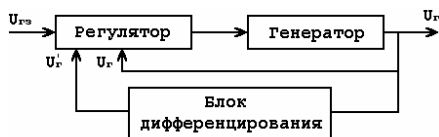


Рис. 8.15

В реальной электрической системе считается достаточным с точки зрения поддержания требуемой точности напряжения генератора иметь коэффициент усиления $K_u=50$. Однако ее неустойчивость наступает при $K_u < 10$ и при таких значениях коэффициента усиления АРВ ПД можно говорить лишь о поддержании переходной ЭДС генератора E' , приложенной за его переходным сопротивлением $x'd$. Добиться же требуемой точности поддержания напряжения генератора U_g при одновременном обеспечении его устойчивости можно применив АРВ сильного действия (АРВ СД).

В отличие от АРВ ПД, АРВ СД осуществляет регулирование не только по отклонению напряжения генератора, но и по его скорости, путем формирования управляющего воздействия пропорционального не только отклонению ΔU_g , но и скорости U'_g . На рис.8.15 приведена функциональная схема системы с АРВ СД.

Из сказанного вытекает закон регулирования, реализующий АРВ СД, аналитическая форма записи которого имеет вид

$$\Delta E_g = -K_u \Delta U_g - K_u' U'_g, \quad (8.18)$$

где K_u' - коэффициент усиления регулятора по скорости изменения напряжения генератора U'_g , определяющий степень принудительного производимого изменения ЭДС генератора при появлении скорости изменения напряжения генератора U'_g .

а)	б)	в)	г)	$K_u > K_{u\max}$	$K_{u\min} < K_u < K_{u\max}$	АРВ СД			
Рис. 8.16				$K_u = 0$	$K_u = \alpha$	АРВ СД			
U_g	$U_{г*}$	$U_{г'}$	$U_{г1}$	$K_u > \alpha$	$K_{u\min} < K_u < K_{u\max}$	АРВ СД			
U_g	$U_{г*}$	$U_{г'}$	$U_{г1}$	U_g	$U_{г*}$	$U_{г'}$	$U_{г1}$	$K_u > K_{u\max}$	АРВ СД
U_g	$U_{г*}$	$U_{г'}$	$U_{г1}$	t	t	t	t		

Работа генератора с АРВ СД в переходном режиме, обусловленная наличием канала регулирования по отклонению напряжения генератора ΔU_g происходит описанной выше работе генератора с АРВ ПД. Наличие же канала регулирования по скорости изменения напряжения генератора U'_g приводит к появлению дополнительного электромагнитного момента генератора $\Delta M'_p$, стремящегося как и ранее рассмотренные моменты

ΔM и ΔM_p вернуть генератор в состояние равномерного вращательного движения. Но так как сигнал пропорциональный скорости изменения напряжения генератора опережает по фазе на 90° сигнал пропорциональный самому этому напряжению, то и момент $\Delta M'_p$ опережает по фазе на 90° действие момента ΔM_p . Поэтому, если момент ΔM_p запаздывает в действии по отношению к избыточному моменту ΔM , то момент $\Delta M'_p$ опережает в действии последний. Это, в свою очередь, означает, что в отличие от момента ΔM_p момент $\Delta M'_p$ за период колебаний совершает работу, уменьшающую энергию колебательной системы. Тем самым появляется возможность, влияя на величину момента ΔM_p путем изменения коэффициента усиления K_u' , принудительно влиять на интенсивность вывода энергии из колебательной системы. Так, если система неустойчива (рис.8.16а) по причине увеличения ее энергии от периода к периоду колебаний, то можно, выбрав определенный коэффициент усиления K_u' больше некоторого минимально допустимого значения $K_{u\min}$, обеспечить наряду с потерями дополнительный вывод энергии из системы, причем такой, что полная энергия системы от периода к периоду будет убывать, колебания будут затухающими, а система устойчивой (рис.8.16б). Установив в АРВ СД еще больший коэффициент усиления K_u' , можно получить аperiodический закон восстановления напряжения генератора (рис.8.16в). При увеличении коэффициента усиления K_u' , по аналогии с увеличением коэффициента K_u , происходит увеличение запаздывания в действии момента $\Delta M'_p$. Это ведет к уменьшению принудительно выводимой энергии из колебательной системы и при коэффициенте усиления более значения $K_{u\max}$ ее может выводиться больше чем закачиваться при совершении работы моментом ΔM_p . В результате энергия системы от периода к периоду будет увеличиваться, амплитуда колебаний возрастать, а система будет неустойчивой. Поэтому во избежание неустойчивости системы при применении АРВ СД коэффициент усиления K_u' в нем следует устанавливать не менее $K_{u\min}$ и не более $K_{u\max}$.

Применение АРВ СД дает возможность одновременно обеспечивать требуемую точность поддержания напряжения U_g генератора путем установки соответствующего значения коэффициента усиления K_u (обычно $K_u=50$) и его статическую устойчивость путем установки коэффициента усиления $K_{u\min} < K_u' < K_{u\max}$. Причем нижняя граница этого интервала $K_{u\min}$ будет больше, а верхняя граница $K_{u\max}$ меньше при большем установленном коэффициенте усиления K_u . Это обусловлено необходимостью большего вывода энергии из системы при совершении работы моментом $\Delta M'_p$, вызванного увеличением закачиваемой энергии в систему при совершении работы моментом ΔM_p . Графически область допустимых с точки зрения статической устойчивости генератора коэффициентов усиления K_u и K_u' может быть представлена в виде заштрихованной части площади первого квадрата системы координат, по осям которой отложены значения коэффициентов усиления K_u и K_u' (рис.8.17).

Координаты K_{uT} и $K_{u'T}$ точки А, лежащей внутри допустимой области, означают, что если в АРВ ПД генератора установить коэффициент усиления $K_u=K_{uT}$ и $K_u'=K_{u'T}$, то генератор будет статически устойчив. При этом, если коэффициент усиления K_{uT} выбирается из условия обеспечения требуемой точности поддержания напряжения

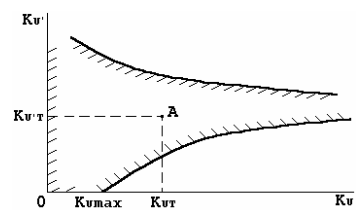


Рис. 8.17

$U_{г}$ генератора, то коэффициент усиления $K_{Уг}$ - из условия обеспечения требуемого качества (времени, степени затухания и т.п.) переходного процесса.

На современных генераторах с целью более оптимального обеспечения условий устойчивости и качества протекания переходных процессов устанавливают АРВ СД, осуществляющие регулирование не только по отклонению $\Delta U_{г}$ напряжения генератора и его скорости $U'_{г}$, но и по отклонению от синхронной его частоты вращения Δf и скорости ее изменения f' , а также по скорости изменения тока возбуждения I'_{f} .

Так как с помощью АРВ СД обеспечивается требуемая точность поддержания напряжения генератора, то при расчетах статической устойчивости такой генератор в схеме замещения можно учитывать его напряжением $U_{г}$ и нулевым сопротивлением.

9. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

До сих пор предполагалось, что в электрической системе (рис.2.1) приемная система С бесконечно мощная (внутреннее сопротивление x_c эквивалентного генератора G_c равно нулю), то есть ЭДС E_c генератора G_c и напряжение U_c на шинах приемной системы равны и независимы от режима (постоянны). Такое допущение справедливо, если мощность генератора G_c значительно (более чем в 10 раз) превышает мощность генератора G . В противном случае, при учете внутреннего сопротивления x_c генератора G_c , шины приемной системы можно рассматривать как промежуточную точку в электрической системе (рис.2.1). В разделе же 8 установлено, что изменение режима электрической системы, приводящее к изменению угла δ , влечет и изменение напряжения в любой ее промежуточной точке. Поэтому напряжение U_c не будет оставаться постоянным при изменении режима работы электрической системы. В этой связи рассмотрим влияние факта такого изменения напряжения U_c на шинах приемной системы на характеристику момента и мощности генератора, играющих в вопросах устойчивости главенствующую роль. При этом будем считать ЭДС $E_g = \text{const}$, $E_c = \text{const}$, но сопротивление $x_c \neq 0$. В отличие от характеристики момента (мощности) генератора G , полученной в предположении постоянства напряжения на шинах приемной системы С ($U_c = \text{const}$) и представляющей собой синусоиду (рис.4.1), характеристика момента (мощности) генератора G с учетом изменения этого напряжения имеет более сложный характер. Получим ее (рис.9.1) путем соединения точек, расположенных на предварительно построенных при различных значениях напряжения U_c характеристиках момента (мощности) генератора G , точек соответствующих углам δ , вытекающим из зависимости (рис.8.2), но построенной для напряжения U_c на шинах приемной системы.

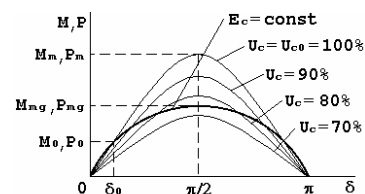


Рис. 9.1

Как видно из рисунка максимум M_{mg} (P_{mg}) характеристики момента (мощности) меньше идеального предела момента (M_m) (мощности P_m) и носит название действительного предела момента (мощности) генератора. Это объясняется уменьшением индукции B_c поля из-за снижения напряжения U_c на шинах приемной системы, связанного с увеличением активной мощности генератора G (угла δ), в котором располагаются активные части обмотки возбуждения, а следовательно и воздействующей на них электромагнитной силы, создающей электромагнитный момент. Очевидно, что, чем меньше активная мощность приемной системы С, тем больше сопротивление x_c эквивалентного генератора G_c , тем больше на нем падение напряжения, а следовательно при $E_c = \text{const}$ меньше напряжение U_c и действительный предел момента M_{mg} и мощности P_{mg} .

Таким образом, ограниченность мощности приемной системы С ($x_c \neq 0$) снижает устойчивость генератора G .

10. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

К шинам приемной системы С (рис.2.1) подключена нагрузка Н. До сих пор предполагалось, что она никак не влияет на устойчивость генератора G . Однако при изменении режима системы и связанного с этим, например, увеличением угла δ , как это было показано выше, снижается напряжение U_c на шинах приемной системы, а значит и на нагрузке Н. Снижение напряжения сопровождается, как правило, уменьшением как активной, так и реактивной мощностей потребляемых нагрузкой. Происходящее при этом уменьшение потоков мощности в сети, питающей нагрузку, уменьшает падения напряжения на ее элементах (генераторах, трансформаторах, линиях), что в некоторой степени поддерживает напряжение на нагрузке (шинах приемной системы), снижающееся при увеличении угла δ . Значительно большее влияние при этом оказывает степень изменения реактивной мощности нагрузки, а не активной, поскольку падения напряжения на индуктивных сопротивлениях элементов сети определяются прежде всего реактивными токами. Эффект влияния нагрузки на напряжение в точке ее включения получил название регулирующего эффекта нагрузки (РЭН). Так как влияние нагрузки Н на напряжение U_c на шинах приемной системы имеет стабилизирующий характер, то с учетом регулирующего эффекта нагрузки Н генератор G будет иметь больший действительный предел момента M'_{mg} (мощности P'_{mg}), что и проиллюстрировано на рис.10.1.

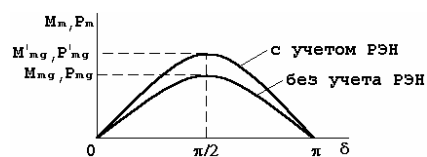


Рис. 10.1

Таким образом РЭН благотворно сказывается на устойчивости генератора Г. Однако не при любых условиях РЭН проявляется через стабилизацию напряжения на нагрузке. Так, если в составе нагрузки значительная доля асинхронных двигателей, то при снижении напряжения на ней до определенного значения, называемого критическим, начинается лавинообразное снижение этого напряжения (“лавина напряжения”), приводящее к нарушению устойчивости генератора Г. Связано это с увеличением потребления асинхронными двигателями реактивной мощности после снижения напряжения на них ниже критического значения. Причины этому будут изложены ниже.

11. ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОМЕНТА ТУРБИНЫ ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ

До сих пор предполагалось, что момент, создаваемый турбиной Т генератора Г в электрической системе (рис.2.1), не зависит от ее режима (постоянный). В действительности же турбина имеет регулятор, предназначенный, в частности, для поддержания требуемых ее момента M_t (мощности P_t) и скорости ω_f вращения вместе с генератором. Регулятор, реагируя на отклонение момента M_t (мощности P_t) и скорости ω_f от требуемых значений, изменяет выпуск энергоносителя (пара, воды, газа) в турбину, а с ним и момент M_t турбины до тех пор, пока не будут обеспечены эти требуемые значения. Изменение выпуска энергоносителя в паровой турбине осуществляется путем изменения положения регулирующих клапанов, а в гидравлической - направляющих аппаратов. Эти устройства, как и механизмы, приводящие их в действие, обладают значительной механической инерцией. Это обстоятельство не позволяет регулирование скорости турбины осуществлять достаточно быстро и точно, чтобы момент турбины следовал за изменением противодействующего ему электромагнитного момента генератора без заметного запаздывания во времени, и тем самым свести к минимуму их разницу, являющуюся непосредственной причиной нарушения устойчивости генератора. Исследования показали, что в практических случаях, при колебаниях электромагнитного момента M генератора в ходе переходного процесса регулирующие устройства турбины остаются практически неподвижными и поэтому момент турбины неизменным (рис.11.1).

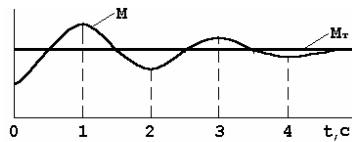


Рис. 11.1

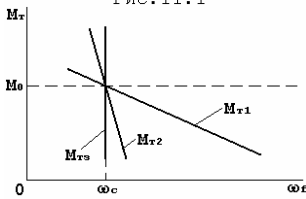


Рис. 11.2

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о практическом отсутствии влияния регулятора турбины на статическую (динамическую) устойчивость генератора. В то же время регулятор турбины играет важную роль в обеспечении условий ресинхронизации генератора после потери устойчивости, то есть обеспечении его результирующей устойчивости. Эта роль объясняется сильной зависимостью развиваемого регулируемой турбиной момента M_t от скорости ее вращения ω_f при медленном изменении последней. Это проиллюстрировано на рис.11.2, где приведены статические характеристики момента турбины M_t от скорости ω_f : M_{t1} - для нерегулируемой турбины; M_{t2} и M_{t3} - при статическом и астатическом регулировании турбины; M_{t3} - при астатическом регулировании.

12. ПОНЯТИЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проведенные рассуждения позволяют углубить ранее введенное понятие результирующей устойчивости применительно к генератору Г в электрической системе (рис.2.1).

Данное в разделе 1 определение результирующей устойчивости предполагает наличие, во-первых, этапа нарушения устойчивости генератора, во-вторых, этапа пребывания его в неустойчивом состоянии и, в третьих, этапа восстановления устойчивой работы.

Рис.12.1

Этап нарушения устойчивости	Этап нарушения устойчивости	t	a	c	s'	$\delta_{уст}$	b	M_{II}	M_t	M_0	M_t	M
						δ_0	M_{acr}	t_1	s	s_{cp}	δ	
Этап неустойчивости	Этап нарушения устойчивости		π			$\delta_{кр}$	M_t	t_2	$\delta(\theta)$		M_t	
		0				δ		t_3	$s_{кр}$			

Рассмотрим этап нарушения устойчивости генератора Г, причиной которого, например, является отключение одной из цепей линии электропередачи Л электрической системы (рис.2.1). Характеристика начала этого этапа дана в разделе 6 и отражена на рис.6.2.б.

Далее процесс идет с прогрессирующим нарастанием угла δ из-за превышения вращающего момента турбины M_t над тормозящим моментом M_{II} генератора. Достижение углом δ в момент времени t_1 значения 2π говорит о том, что ротор генератора Г повернулся на один оборот относительно ротора генератора Гс приемной системы, что, в свою очередь, означает переход его в неустойчивое состояние (рис.12.1). Момент времени t_1 при этом можно считать границей, разделяющей этапы нарушения устойчивости генератора и пребывания его в неустойчивом состоянии. За время t_1 одного проворота ротора генератора избыточный момент $\Delta M = M_t - M_{II}$ был большей частью ускоряющим и совершил работу по увеличению кинетической энергии турбоагрегата (турбины и генератора), то есть увеличил скорость ω_f ротора генератора Г или его скольжение $s = (\omega_f - \omega_c) / \omega_c$. Если более не учитывать никаких факторов, то за время каждого последующего проворота ротора (будет увеличиваться кинетическая энергия турбоагрегата и следовательно его среднее скольжение. Мгновенное (полное) же скольжение s будет увеличиваться, колеблясь вокруг среднего значения s_{cp} . Это связано с колебательным характером избыточного момента ΔM , а точнее, являющегося его частью, момента M_{II} генератора. Однако с появлением скольжения s и связанного с этим проскальзывания ро-

тора генератора Г относительно магнитного поля с индукцией B_c в теле последнего, а также в его демпферных обмотках и обмотке возбуждения наводятся токи с частотой скольжения s . Взаимодействие этих токов и магнитного поля с индукцией B_c согласно закону Ампера приводит к появлению тормозящего электромагнитного момента M_a , получившего название асинхронного. Его величина в рассматриваемом случае при относительно небольших значениях скольжения s может считаться пропорциональной значению s . Поэтому с каждым проворотом ротора и ростом среднего скольжения s_{cp} растет и величина среднего асинхронного момента $M_{аср}$. По достижении в момент времени t_2 средним асинхронным моментом $M_{аср}$ момента турбины M_t среднее скольжение s_{cp} достигает максимального значения $s_{срм}$, так как среднее значение избыточного момента $\Delta M_{ср} = M_t - M_{аср}$ становится равно нулю. Величина $s_{срм}$, например, для турбогенераторов невелика и составляет десятые доли процента от синхронной скорости ω_c . Одновременно с этим, с одной стороны, вследствие увеличения скольжения s при неизменном впуске энергоносителя в турбину (значении развиваемой турбиной активной мощности) уменьшается ее момент M_t (см. характеристику M_t на рис.11.2) и, с другой стороны, в результате работы регулятора турбины уменьшается выпуск энергоносителя в последнюю, а следовательно и ее момент M_t . Однако в силу инерционности регулятора заметное снижение момента турбины происходит не сразу, а, например, начиная с момента времени t_1 (рис.12.1). Снижение момента M_t турбины происходит и после уравнивания его средним асинхронным моментом $M_{аср}$ генератора в результате продолжающегося действия регулятора скорости, пытающегося снизить скорость ротора ω_f генератора до синхронной ω_c (скольжение s до нуля). Это вызывает интенсивное снижение скольжения s и соответствующего ему среднего асинхронного момента $M_{аср}$. В момент времени t_3 ротор генератора завершает последний проворот, а в момент времени t_4 мгновенное значение скольжения s становится равно нулю, и это считается началом этапа восстановления устойчивости. Условие равенства скольжения s нулю является необходимым для успешной ресинхронизации генератора. Будет ли при этом ресинхронизация генератора успешной зависит от значения угла $\delta(0)$ при котором скольжение $s=0$. Если оно будет меньше $\delta_{кр}$, как это показано на рис.12.1, то ресинхронизация будет успешной, так как процесс будет протекать аналогично описанному в разделе 6 и отраженному на рис.6.12.а с той только разницей, что регулятор турбины будет поднимать ее момент до прежнего значения M_0 . В результате восстанавливается синхронная скорость вращения ротора генератора ($s=0$), регулятор увеличивает момент турбины до прежнего значения M_0 , а угол δ устанавливается на уровне $\delta_{уст}$, соответствующем новому режиму с отключенной цепью линии электропередач Л. Таким образом генератор Г самостоятельно восстанавливает нормальный режим работы после некоторого периода несинхронной работы с генератором Гс и поэтому согласно определению его можно считать обладающим результирующей устойчивостью.

Очевидно, что на рассмотренный процесс влияет множество факторов, как то, параметры регулятора турбины и возбуждения, сети, к которой подключен генератор, параметры самого генератора. Поэтому задачей расчета результирующей устойчивости применительно к рассматриваемому случаю является определение оптимального сочетания этих параметров, минимизирующих риск нанесения ущерба как самому генератору, так и системе в которой он работает.

13. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ

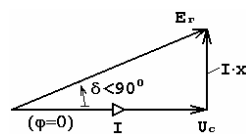


Рис. 13.1

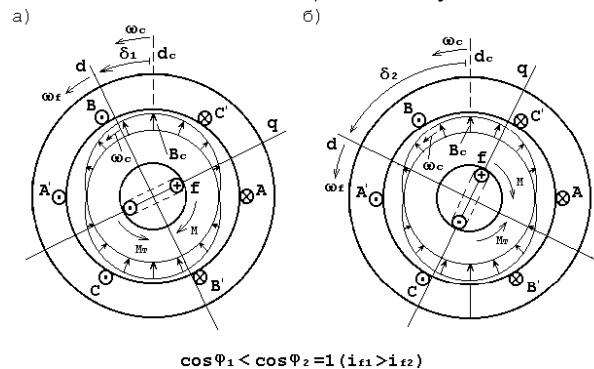


Рис. 13.2

До сих пор при рассмотрении происходящих в электрической системе (рис.2.1) изменений режима никак не оговаривалось соотношение между развиваемой генератором активной P и реактивной Q мощностями, представляемое обычно в форме коэффициента мощности $\cos\varphi = \cos(\arctg Q/P)$. Рассмотрим влияние коэффициента мощности генератора на характеристику его момента и через нее на устойчивость. Договоримся изменять значение $\cos\varphi$ только путем изменения реактивной мощности Q , оставляя активную мощность P неизменной. Если генератор выдавал реактивную мощность Q в электрическую систему, то для увеличения его отстающего коэффициента мощности $\cos\varphi$ до единицы необходимо снижать реактивную мощность Q , чего можно добиться уменьшением ЭДС E_g генератора путем уменьшения его тока возбуждения. Последнее, при прочих равных условиях, снижает развиваемый генератором электромагнитный момент M , так как согласно закону Ампера на проводник (обмотку возбуждения) с меньшим током действует и меньшая электромагнитная сила. Для восстановления электромагнитного момента генератора до прежнего значения, равного неизменному моменту M_t турбины, его обмотка возбуждения перемещается в более сильное поле с индукцией B_c и ротор занимает новое положение в пространстве относительно ротора генератора Гс приемной системы, характеризуемое большим значением угла δ . При этом режим $\cos\varphi=1$ ($Q=0$) существует всегда при угле $\delta < \pi/2$, что вытекает из рассмотрения векторной диаграммы режима системы (рис.13.1).

На рис.13.2а,б показаны положения ротора генератора соответственно при отстающем $\cos\varphi$ и $\cos\varphi=1$.

Снижение тока возбуждения ниже значения, при котором, $\cos\varphi=1$, приводит, с одной стороны, к еще большему снижению возможности генератора по созданию электромагнитного момента и, с другой, к увеличению потребления генератором реактивной мощности из приемной системы, то есть уменьшению опережающего $\cos\varphi$. При некотором значении опережающего $\cos\varphi$ угол δ достигает значения $\pi/2$ и генератор теряет устойчивость. Сказанное иллюстрируется рис.13.3, на котором изображены характеристики момента генератора при различных значениях $\cos\varphi$.

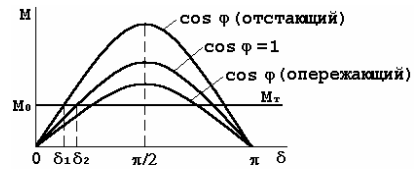


Рис. 13.3

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что с точки зрения устойчивости режимы генератора с опережающим коэффициентом мощности $\cos\varphi$ являются нежелательными.

14. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ

Те или иные свойства нагрузки, как это было показано выше, оказывают непосредственное влияние на устойчивость параллельной работы синхронных генераторов. Однако в определенных условиях нагрузка сама может оказаться неустойчивой. Так, например, известно, что асинхронные двигатели, которые обычно и представляют основную часть нагрузки электрических систем, при значительном снижении напряжения на их выводах, опрокидываются и останавливаются. Если асинхронные двигатели при большом или малом возмущении режима системы не опрокидываются, то говорят, что они устойчивы.

14.1 Модель нагрузки

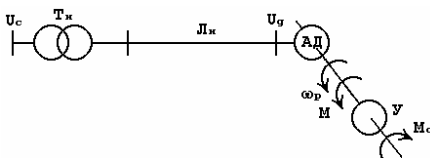


Рис. 14.1

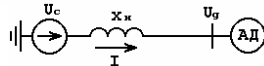


Рис. 14.2

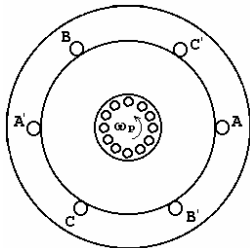


Рис. 14.3

Вопросы устойчивости нагрузки будем обсуждать применительно к наиболее представительной ее части, какой являются асинхронные двигатели. Нагрузку N в схеме электрической системы (рис.2.1) представляем в виде эквивалентного асинхронного двигателя АД, подключенного к шинам приемной системы через линию электропередачи Ln и трансформатор Tn (рис.14.1).

Асинхронный двигатель АД вращается со скоростью ω_p , создает электромагнитный момент M и приводит в действие устройство $У$, оказывающее противодействие в виде момента сопротивления M_c .

С учетом допущения об отсутствии активных потерь в трансформаторе Tn и линии Ln на рис.14.2 изображена схема замещения приведенной на рис.14.1 электрической сети.

Здесь x_n - индуктивное сопротивление трансформатора Tn и линии Ln ; I - ток в цепи; U_g - напряжение на зажимах двигателя АД; U_c - напряжение на шинах приемной системы.

Асинхронный двигатель представляет собой трехфазную асинхронную машину с короткозамкнутой обмоткой на роторе, выполненной в виде "беличьей клетки". Его поперечный разрез приведен на рис.14.3.

14.2. Принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель предназначен для преобразования электрической энергии в механическую с целью ее расходования при совершении работы приводимым им в действие устройством $У$ (рис.12.1). Для осуществления такого преобразования энергии двигателем при вращении в установившемся режиме должен создаваться электромагнитный вращающий момент M , совершающий работу по преодолению равного и встречно направленного ему момента M_c сопротивления, создаваемого устройством $У$. Рассмотрим механизм создания такого электромагнитного момента.

При подключении неподвижного двигателя к электрической сети в каждой из его фазных обмоток появляется ток I . Токи фазных обмоток создают в магнитной системе двигателя вращающееся со скоростью ω_c магнитное поле с индукцией B_c , которую, для упрощения рассуждений будем считать распределенной вдоль окружности статора по синусоидальному закону. Кривая распределения индукции B_c изображена на рис.14.4, расположенной в воздушном зазоре двигателя и вращающейся со скоростью ω_c . Поле с индукцией B_c , перемещающейся относительно неподвижной обмотки ротора, наводит в ней ЭДС E_p , под действием которой в каждом стержне короткозамкнутой обмотки ротора появляется ток I_p . Токи в стержнях создают магнитное поле с индукцией B_p , которое согласно правилу Ленца противодействует породившему его магнитному полю с индукцией B_c , стремясь компенсировать последнее (рис.14.4а). Поэтому магнитное поле с индукцией B_p распределено вдоль окружности ротора также по синусоидальному закону и неподвижно относительно поля с индукцией B_c , то есть вращается со скоростью ω_c . Одна-

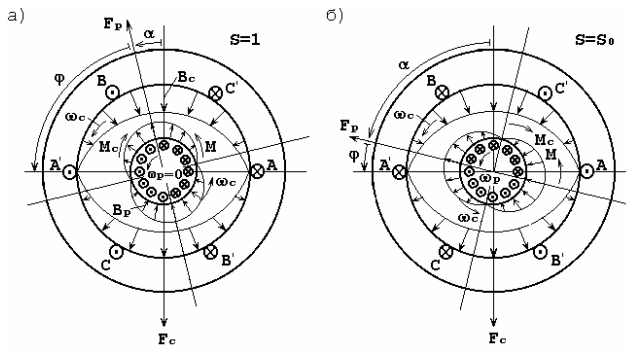


Рис. 14.4

Вс. На них согласно закону Ампера и правилу “левой руки” действуют силы, которые в сумме и определяют электромагнитный момент M двигателя. Этот момент отличен от нуля и направлен в сторону вращения поля с индукцией B_c , так как, во-первых, число стержней обмотки ротора, на которые действуют силы, стремящиеся повернуть ротор в указанном направлении, больше числа стержней, на которые действуют противоположно направленные силы, и во-вторых, каждый стержень из первой группы находится в более сильном магнитном поле, нежели стержень с таким же током из второй группы, и на него поэтому действует и большая сила.

Если момент сопротивления M_c устройства Y больше момента M двигателя, то последний не в состоянии сдвинуться с места и поэтому неподвижен, потребляет из сети незначительную активную мощность, идущую на покрытие активных потерь от протекания токов по его обмоткам, и значительную реактивную мощность. Последнее объясняется тем, что наводимая в обмотке ротора ЭДС E_r и протекающий под ее действием ток I_r изменяются с частотой $\omega_s = \omega_c$ скольжения, при которой пропорциональное ей индуктивное сопротивление обмотки ротора значительно превышает активное сопротивление последней. В результате фазовое отставание φ тока I_r от ЭДС E_r близко к $\pi/2$, то есть угол опережения α незначителен (рис. 14.4а). Поэтому поле токов обмотки ротора с индукцией B_r в значительной мере компенсирует поле токов обмоток статора с индукцией B_c , то есть оказывает значительное размагничивающее действие на статорные обмотки. В результате неподвижный двигатель характеризуется малой индуктивностью (индуктивным сопротивлением) статорных обмоток и следовательно потребляет значительный реактивный ток (реактивную мощность). Таким образом в заторможенном состоянии двигатель преобразования электрической энергии в механическую не осуществляет.

Если же момент сопротивления M_c меньше момента M двигателя, то последний под действием избыточного вращающего момента приходит в движение и разгоняется до скорости ω_r , при которой упомянутые моменты компенсируют друг друга. Эта скорость ω_r меньше синхронной ω_c , а в идеальном случае при моменте $M_c=0$ равна ей. Последнее обусловлено тем, что при этом обмотка ротора неподвижна относительно поля с индукцией B_c , в ней не наводится ЭДС E_r , не протекает ток I_r и поэтому не создается электромагнитный момент M , то есть $M_c=M=0$. При вращении же ротора двигателя со скоростью $\omega_r < \omega_c$ наводимая в его обмотке ЭДС E_r и определяемый ею ток I_r изменяются с меньшей, чем у заторможенного двигателя, частотой ω_s на величину скорости ω_r вращения ротора. При меньшей частоте обмотка ротора характеризуется пропорциональным ей меньшим индуктивным сопротивлением x_r , что проявляется в меньшем фазовом отставании φ тока I_r от ЭДС E_r и следовательно в большем угле опережения α (рис. 14.4б) по сравнению с заторможенным двигателем (рис. 14.4а). Это означает, что в отличие от неподвижного во вращающемся двигателе поле токов обмотки ротора с индукцией B_r в меньшей мере компенсирует поле токов статорных обмоток с индукцией B_c , то есть оказывает меньшее размагничивающее действие на статорные обмотки. В результате двигатель характеризуется большей индуктивностью (индуктивным сопротивлением) статорных обмоток и следовательно потребляет меньший реактивный ток (реактивную мощность). В идеальном случае при скольжении $s=0$ в обмотке ротора ЭДС E_r не наводится, ток I_r отсутствует, поэтому отсутствует и размагничивающее действие на статорные обмотки магнитного поля тока I_r роторной обмотки, следовательно двигатель характеризуется наибольшей индуктивностью (индуктивным сопротивлением) статорных обмоток и потребляет минимальный реактивный ток (реактивную мощность). Во вращающемся со скольжением $s \neq 0$ двигателе ЭДС E_r совершает работу, покрывающую кроме активных потерь энергии, связанных с протеканием тока I_r в обмотке ротора, еще и потери энергии при совершении электромагнитным моментом M работы по преодолению момента сопротивления M_c устройства Y . Совершение электромагнитным моментом двигателя работы по преодолению момента сопротивления M_c означает преобразование электрической энергии в механическую, расходуемую на совершение работы устройством Y .

14.3. Характеристика электромагнитного момента асинхронного двигателя

При рассмотрении вопросов, связанных с устойчивостью асинхронного двигателя, удобно пользоваться характеристикой его электромагнитного момента, далее просто характеристикой момента, представляющей собой зависимость создаваемого двигателем момента от скольжения $s = \omega_c - \omega_r / \omega_c = \omega_s / \omega_c$. Получим ее путем увеличения момента сопротивления M_c на валу двигателя относительно идеального исходного режима, характеризуемого моментом $M_c=0$, скольжением $s=0$ и, как было показано ранее, моментом $M=0$.

ко направление намагничивающей силы F_r магнитного поля с индукцией B_r не противоположно направлению намагничивающей силы F_c магнитного поля с индукцией B_c , а смещено от этого положения на некоторый угол опережения α (рис. 14.4а). Это объясняется тем, что ЭДС E_r на каждом периоде своего изменения совершает работу, покрывающую активные потери энергии при протекании тока I_r в обмотке ротора. Следствием этого является фазовое отставание φ тока I_r от ЭДС E_r на угол не $\pi/2$, как при неучете упомянутых активных потерь, а меньший его на величину α .

Из рис. 14.4а видно, что проводники с током обмотки ротора находятся в магнитном поле с индукцией

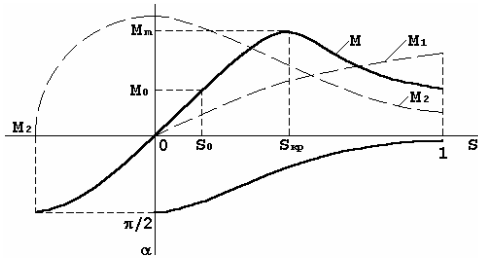


Рис. 14.5

Однако увеличение частоты скольжения ωs обуславливает пропорциональное ей увеличение индуктивного сопротивления x_r обмотки ротора и связанное с этим некоторое ограничение увеличения тока I_r этой обмотки при увеличении скольжения s . Результатом этого является непропорциональное увеличение тока I_r и зависящего от него момента при увеличении скольжения s . Изменение момента M_1 от величины скольжения s с учетом рассмотренных факторов изображено на рис.14.5 и характеризует первую тенденцию этого изменения. В то же время увеличение индуктивного сопротивления x_r обмотки ротора обуславливает большее фазовое запаздывание φ тока I_r этой обмотки от наводимой в ней ЭДС E_r , то есть меньшее значение угла опережения $\alpha = \pi/2 - \varphi$. Из теории электрических цепей переменного тока известно, что в последовательной электрической цепи, каковой является и обмотка ротора, обладающая активным r_r и индуктивным x_r сопротивлениями, угол запаздывания φ зависит от индуктивного сопротивления x_r или от скольжения s , которому оно пропорционально ($x_r = \omega s L_p = s \omega c L_p$, где L_p - индуктивность обмотки ротора) по закону арктангенса. По аналогичному закону, но со смещением на угол $\pi/2$, зависит от скольжения s и угол опережения α (рис.14.5). Уменьшение угла опережения α означает изменение друг относительно друга направлений намагничивающих сил F_r и F_c соответственно обмоток ротора и статора двигателя от их ортогональности к противофазности. Так как ортогональные магнитные поля не взаимодействуют, а противофазные взаимодействуют наиболее сильно, то уменьшение угла опережения α от значения $\pi/2$ до нуля означает увеличение электромагнитного момента двигателя от нуля до максимального значения. С учетом же того, что упомянутые поля распределены в воздушном зазоре двигателя вдоль окружности статора и ротора по синусоидальному закону, по этому же закону при уменьшении угла опережения α , при прочих неизменных условиях, увеличивается и электромагнитный момент M_2 двигателя (рис.14.5). С учетом же зависимости угла опережения α от скольжения s (рис.14.5) зависимость изменения момента M_2 от скольжения s имеет вид, приведенный на рис.14.5, и определяет вторую тенденцию его изменения.

Совместный учет двух рассмотренных тенденций изменения момента M_1 и M_2 позволяет определить истинный вид характеристики момента M двигателя. Из рис.14.5 следует, что при увеличении скольжения до значения s_{kp} , называемого критическим, преобладает первая тенденция, то есть скорость изменения момента M_1 превышает скорость изменения момента M_2 , и поэтому истинный момент M двигателя увеличивается. При критическом скольжении s_{kp} тенденции уравнены и двигатель развивает максимальный момент M_m . При увеличении скольжения от s_{kp} до 1 преобладает уже вторая тенденция и момент M уменьшается.

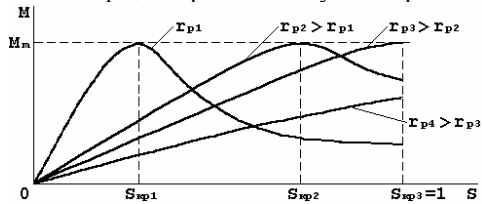


Рис. 14.6

этих сопротивлений ($x_r = r_r$). Учитывая, что сопротивление x_r и индуктивность L_p обмотки ротора связаны известным соотношением

$$x_r = \omega r L_p = s \omega c L_p, \quad (14.2)$$

можно сделать вывод о прямой зависимости критического скольжения s_{kp} от активного сопротивления r_r

$$s_{kp} = r_r / (\omega c L_p). \quad (14.3)$$

При этом активная мощность, потребляемая обмоткой ротора,

$$P_m = E_r I_r \cos \varphi = (E_r E_r) / (r_r^2 + x_r^2)^{1/2} \cos(\arctg(x_r / r_r)) = E_r E_r / (x_r 2^{1/2}) \cos(\arctg 1) = (E_r E_r 2^{1/2}) / (x_r 2^{1/2} 2) = E_r^2 / (2 x_r), \quad (14.4)$$

а создаваемый двигателем момент из выражения (14.1) с учетом значения мощности P_m из выражения (14.4)

$$M_m = P_m / s \omega c = E_r^2 / (2 s \omega c x_r). \quad (14.5)$$

Учитывая значение сопротивления x_r из выражения (14.2), пропорциональность ЭДС E_r скольжению s и напряжению U_g , получаем, что максимальный момент

$$M_m \sim (s^2 U_g^2) / (2 s \omega c s \omega c L_p) = U_g^2 / (2 \omega c^2 L_p) \quad (14.6)$$

не зависит от скольжения. Полученные выводы иллюстрируются на рис.14.6 характеристиками момента двигателя, соответствующими различным активным сопротивлениям r_r его обмотки ротора.

При увеличении момента сопротивления M_c возникает избыточный тормозящий момент $\Delta M = M - M_c < 0$, под действием которого снижается скорость ωr (увеличивается скольжение $s = 1 - \omega r / \omega c$) двигателя. Это обуславливает увеличение пропорционально скольжению s наводимой в обмотке ротора ЭДС E_r , вызванного ею тока I_r и частоты их изменения, равной частоте $\omega s = s \omega c$ скольжения. Увеличение тока I_r в обмотке ротора при прочих неизменных условиях в соответствии с законом Ампера должно приводить к пропорциональному увеличению создаваемого двигателем электромагнитного момента, а значит и к увеличению последнего пропорционально скольжению s .

При сопротивлении $r_r=r_{r3}$ максимальный момент M_m имеет место при скольжении $s=1$, то есть при неподвижном роторе. Этим широко пользуются для облегчения пуска двигателя, вводя на этапе пуска в обмотку ротора дополнительное активное сопротивление.

14.4. Статическая устойчивость асинхронного двигателя

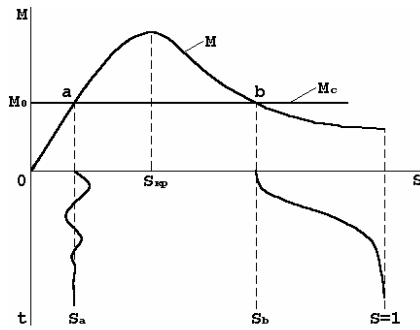


Рис. 14.7

Расширим понятие статической устойчивости асинхронного двигателя с учетом проведенных рассуждений.

Будем считать момент сопротивления M_c на валу двигателя не зависящим от скольжения s (рис.14.7).

Как отмечалось, нормальный (устойчивый) режим работы двигателя возможен при балансе электромагнитного момента M и момента сопротивления M_c . Формально такой режим может существовать при скольжениях s_a и s_b , соответствующих точкам a и b пересечения характеристик момента M двигателя и момента M_c сопротивления устройства U (рис.14.7).

При малом возмущении режима, соответствующего точке a , появляющееся отклонение скольжения s от значения s_a будет с течением времени затухать по колебательному закону (рис.14.7). Это обусловлено появлением на валу двигателя избыточного момента $\Delta M=M-M_c$, стремящегося приблизить значение s к значению s_a . Так в случае $s>s_a$ избыточный момент ΔM имеет ускоряющий характер ($M>M_c$), что приводит к увеличению скорости двигателя, то есть снижению скольжения s , а при $s<s_a$ - тормозящий характер, что приводит к увеличению скольжения s . В результате двигатель возвращается в прежний нормальный режим работы, характеризуемый скольжением s_a . Поэтому такой режим является статически устойчивым.

При малом возмущении режима, соответствующего точке b , появившееся отклонение скольжения s от значения s_b в конечном счете с течением времени будет прогрессирующе возрастать (рис.14.7), так как появившийся тормозящий избыточный момент ΔM ($M<M_c$) возрастает и стремится еще больше увеличить это отклонение. В результате двигатель снижает скорость и останавливается ($s=1$), то есть не возвращается в нормальный режим работы. Согласно определению такой режим считается статически неустойчивым.

Проведенные рассуждения позволяют сформулировать формальный прямой критерий статической устойчивости асинхронного двигателя, заключающийся в необходимости выполнения условия

$$dM / ds > 0, \quad (14.7)$$

либо с учетом пропорциональности момента M развиваемой двигателем активной мощности P

$$dP / ds > 0. \quad (14.8)$$

Это условие, как следует из рис.14.7, выполняется при значениях скольжения s не превышающих критического скр. Степень статической устойчивости двигателя можно характеризовать коэффициентом запаса статической устойчивости

$$K_c = (M_m - M_0) / M_0 \cdot 100, \% \quad (14.9)$$

Действующие нормы устанавливают необходимый коэффициент запаса K_c для нормальных режимов не менее 70%. Рассчитать статическую устойчивость двигателя это значит определить условия его устойчивой работы, в частности, коэффициент запаса K_c .

14.5. Влияние напряжения питания асинхронного двигателя на его устойчивость

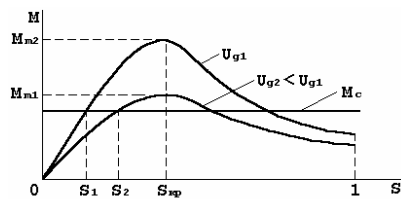


Рис. 14.8

При снижении напряжения U_g питания двигателя пропорционально ему в одинаковой степени уменьшаются индукция B_c магнитного поля и ток I_r обмотки ротора. Следовательно в соответствии с законом Ампера уменьшается и создаваемый двигателем электромагнитный момент. Уменьшение в одинаковой степени индукции B_c и тока I_r означает, что и связанные с ними тенденции в изменении момента двигателя M_1 и M_2 также изменятся в одинаковой степени и будут равны при прежнем критическом значении скольжения скр. То есть максимум момента M_{m2} будет достигаться при прежнем значении скольжения скр (рис.14.8).

Вышесказанное позволяет сделать вывод об отрицательном влиянии снижения напряжения питания двигателя на его устойчивость.

14.6. Влияние параметров элементов электрической системы на устойчивость асинхронного двигателя

При действующих нормах на коэффициент запаса ($K_c>70\%$) двигатель может потерять устойчивость только при снижении напряжения U_g на нем более чем на 30%. Такие снижения напряжения в установившихся режимах в узлах электрической системы, например, напряжения U_c (рис.2.1) невозможны. Однако двигатель подключен к узлу электрической системы не непосредственно, а, например, через линию L_n и трансформатор T_n (рис.14.1), имеющих суммарное индуктивное сопротивление x_n (рис.14.2). При увеличении нагрузки (момента сопротивления

M_c) на валу двигателя его скольжение s в соответствии с характеристикой момента M при неизменности напряжения U_g должно возрасти со значения s_0 до s_1' (рис.14.9).

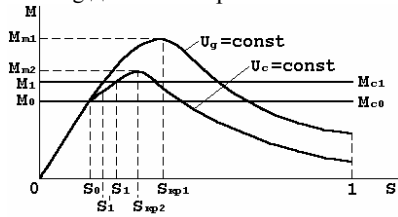


Рис. 14.9

Однако, как было показано ранее, с увеличением скольжения s увеличивается ток I_p обмотки ротора, а следовательно и ток I , потребляемый двигателем из сети (рис.14.2). Ток I на сопротивлении x_n создает падение напряжения, которое при неизменности напряжения U_c в узловой точке электрической системы приводит к снижению напряжения U_g на двигателе. Снижение напряжения U_g в соответствии с рис.14.8 приводит к увеличению скольжения s двигателя и установлению баланса между его моментом и моментом сопротивления M_{c1} при скольжении $s_1 > s_1'$. Снижение момента M двигателя происходит при любых значениях скольжения s , поэтому при критическом скольжении $s_{кр2}$ с учетом снижения напряжения U_g на двигателе будет достигнут и меньший максимальный момент $M_{m2} < M_{m1}$. При напряжении $U_g = \text{const}$ и пренебрежении индуктивностью рассеяния статорной обмотки двигателя максимальный момент M_{m1} создается при критическом скольжении, определяемом из условия (14.3)

$$s_{кр1} = gr / (\omega c L_p) . \quad (14.10)$$

В случае же $U_c = \text{const}$ и прочих равных условиях двигателем создается максимальный момент M_{m2} при скольжении

$$s_{кр2} = gr / (\omega c L_p + x_n') , \quad (14.11)$$

где x_n' - индуктивное сопротивление x_n , приведенное к обмотке ротора. Очевидно, что $s_{кр2} < s_{кр1}$.

Таким образом можно сделать вывод о неблагоприятном влиянии на устойчивость двигателя величины индуктивного сопротивления элементов, через которые двигатель подключен к узловой точке электрической системы.

14.7. Влияние частоты электрической системы на устойчивость асинхронного двигателя

До сих пор предполагалось, что скорость вращения ωc генератора Γ (рис.2.1) неизменна. В действительности же она может меняться, что влечет и изменение циклической частоты $f = 2\pi\omega c$ электрической системы, в том числе, и питающего двигатель напряжения U_g (рис.14.2). Так при снижении циклической частоты f_c снижается и угловая частота ωc , что при неизменном скольжении s вызывает пропорциональное уменьшение индуктивного сопротивления $x_p = s\omega c$ обмотки ротора и связанные с этим, во-первых, увеличение тока I_p этой обмотки и, во-вторых, уменьшение отношения x_p/gr . Уменьшение отношения x_p/gr означает уменьшение угла φ запаздывания тока I_p от ЭДС E_p и соответствующее увеличение угла опережения α , которое, в свою очередь, как это было показано ранее, при прочих неизменных условиях означает увеличение электромагнитного момента (см. зависимость момента M_2 от угла α на рис.14.5). Одновременно с этим увеличение тока I_p обмотки ротора в соответствии с законом Ампера означает более интенсивное увеличение электромагнитного момента M двигателя.

Кроме того, при снижении частоты ωc снижается и индуктивное сопротивление статорных обмоток двигателя. Следовательно увеличиваются протекающие в них токи I и индукция B_c создаваемого ими магнитного поля, что в соответствии с законом Ампера должно приводить к увеличению момента M двигателя пропорционально снижению частоты ωc . Но этого не происходит, так как описанную тенденцию компенсирует противоположная ей тенденция снижения также пропорционального снижению частоты ωc момента M двигателя, связанная со снижением частоты $\omega c = s\omega c$ скольжения пропорциональной ей ЭДС E_p , а следовательно и тока I_p обмотки ротора. Максимум момента M двигателя достигнет в соответствии с условием (14.3) при большем критическом скольжении.

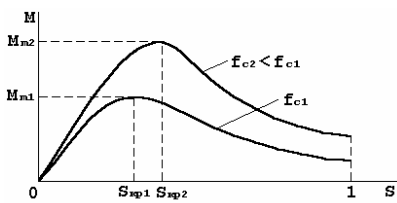


Рис. 14.10

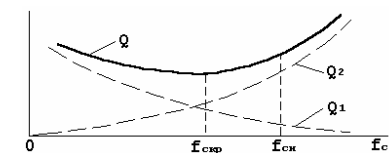


Рис. 14.11

Вышесказанное иллюстрируется характеристиками момента двигателя, построенными при различных частотах f_c системы и приведенными на рис.14.10.

В результате можно сделать вывод о благоприятном влиянии снижения частоты электрической системы на устойчивость двигателя.

Однако при изменении частоты f_c системы изменяется и потребляемая двигателем реактивная мощность Q . Одна часть этой мощности Q_1 расходуется на создание основного магнитного поля, одновременно сцепляющегося со статорными и роторными обмотками, другая часть Q_2 - на создание полей рассеяния статорных и роторных обмоток. При снижении частоты f_c системы, неизменности создаваемого двигателем момента и прочих равных условиях пропорциональное этому снижению наводимой в обмотке ротора ЭДС E_p компенсируется увеличением индукции B_c основного магнитного поля, то есть увеличением реактивного тока статорной обмотки и соответственно увеличением потребляемой двигателем из системы реактивной мощности Q_1 (рис.14.11). В результате зависимость полной реактивной мощности $Q = Q_1 + Q_2$, потребляемой двигателем, имеет U-образный характер (рис.14.11).

Характерно, что частота $f_{кр}$ системы, при которой потребляемая двигателем реактивная мощность Q минимальна, ниже номинальной $f_{сн}$. Это означает, что при снижении частоты от номинальной $f_{сн}$ до критической снижается и потребление двигателем реактивной мощности, поэтому снижение и падение напряжения на трансформаторе T_n и линии L_n (рис.14.1) при ее передаче, а значит при $U_c = \text{const}$ несколько повышается напряжение U_g на двигателе, что, как было показано ранее, благоприятно сказывается на устойчивости двигателя. При снижении

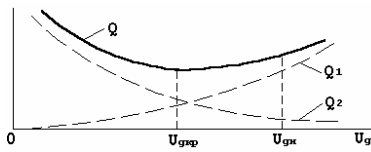


Рис. 14.12

же частоты f_c ниже критической $f_{скр}$ происходит все с точностью до наоборот, то есть в конечном счете происходит уменьшение напряжения U_d двигателя. Однако при уменьшении напряжения U_g двигателя уменьшается и часть потребляемого им реактивного тока, создающего основное магнитное поле, а следовательно уменьшается и пропорциональная им часть реактивной мощности Q_1 (рис.14.12). Одновременно, как было показано ранее, увеличивается скольжение s двигателя и частота ω_r изменения тока I_r в обмотке ротора, что приводит к увеличению наводимой полем рассеяния ЭДС самоиндукции и пропорциональной ей части реактивной мощности Q_2 (рис.14.12). В результате полная потребляемая двигателем реактивная мощность $Q=Q_1+Q_2$ при снижении напряжения на двигателе до критического значения $U_{гкр}$ снижается, а при последующем снижении увеличивается (рис.14.12).

В практических случаях $U_{гн} > U_{гкр}$. Снижение напряжения U_g на двигателе ниже критического $U_{гкр}$ вызывает увеличение потребления им реактивной мощности Q , что, в свою очередь, как это было показано ранее, вызывает еще большее снижение напряжения U_g на двигателе, то есть прогрессирующее его снижение. Это явление получило название “лавинного напряжения”. В результате лавинообразного снижения напряжения на двигателе он опрокидывается и останавливается. Это обстоятельство позволяет говорить о благоприятном влиянии снижения частоты f_c системы на устойчивость двигателя только тогда, когда эта частота не ниже критической $f_{скр}$. В практических случаях $f_{скр}=43-45$ Гц.

15. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ

Под режимом электроснабжения в электрической системе понимается такое ее состояние, когда регламентируется суммарная номинальная активная мощность потребителей электрической энергии (нагрузки), которые могут быть одновременно включены и работать в ней. Каждому такому режиму, характеризуемому меньшим значением активной мощности, присваивается больший порядковый номер, начиная с единицы. Режим электроснабжения в электрической системе планируется на каждые сутки и его номер сообщается по местному радио.

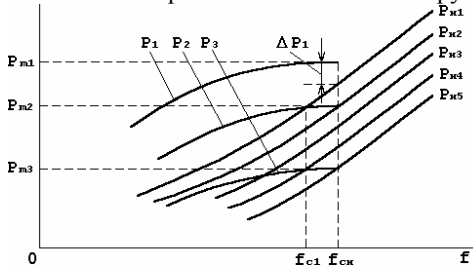


Рис. 15.1

Выявим ранее не учтенное влияние режима электроснабжения на устойчивость простейшей электрической системы (рис.2.1). Для этого воспользуемся зависимостями от ее частоты f_c активных мощностей P и P_n , соответственно развиваемых генераторами Γ и Γ_c и потребляемой нагрузкой N в этой системе при различных режимах электроснабжения (рис.15.1). Основную часть нагрузки представляют асинхронные двигатели. Потребляемая ими активная мощность, с одной стороны, пропорциональна скорости их вращения, а значит и частоте f_c системы, и, с другой стороны, моменту сопротивления на валу, который в большинстве практических случаев растет с увеличением скорости вращения двигателя, а значит и частоты f_c системы. Поэтому зависимости потребляемой нагрузкой активной мощности P_n имеют прогрессирующе возрастающий характер (рис.15.1). Турбины генераторов снабжены регуляторами, обеспечивающими стабильность их скорости вращения, а значит и частоты f_c системы при изменении питаемой ими нагрузки. Эта стабильность обеспечивается путем регулирования впуска в турбину энергоносителя, например, пара. При полном впуске энергоносителя, то есть полном открытии регулирующих устройств турбины, например, регулирующих клапанов в паровых турбинах, турбина, а следовательно и генератор развивают максимальную активную мощность P_m . Поэтому характеристика активной мощности P генераторов при работе регуляторов скорости турбин имеет вид практически вертикальной прямой при номинальной частоте $f_{сн}$ системы. Если при полном открытии регулирующих устройств турбин, то есть при полном впуске энергоносителя, частота f_c снижается, то развиваемая турбиной, а следовательно и генератором активная мощность в среднем также снижается (рис.15.1). Это обусловлено тем, что большая часть генераторов в электрической системе работает на тепловых станциях, где энергоносителем является пар, вырабатываемый парогенераторами. Производительность парогенераторов определяется производительностью механизмов собственных нужд, обеспечивающих подачу в него питательной воды, топлива, воздуха. Большинство из этих механизмов (насосы, мельницы, транспортеры, вентиляторы) приводятся в действие синхронными и асинхронными двигателями. При снижении частоты f_c системы пропорционально ей снижается и скорость вращения этих двигателей, а следовательно и производительность приводимых ими в действие механизмов собственных нужд. В результате снижается и производительность парогенератора, в турбину поступает меньше пара и поэтому турбина и генератор развивают меньшую активную мощность.

В нормальном режиме работы электрической системы номинальная активная мощность работающих генераторов составляет $P_{н1}$ и они развивают при номинальной частоте $f_{сн}$ системы потребляемую нагрузкой активную мощность $P_{н1}$, соответствующую первому режиму электроснабжения, не предусматривающему никаких ограничений для потребителей электроэнергии. При этом имеется запас по генерируемой мощности “горячий резерв” ΔP_1 (рис.15.1). В случае уменьшения числа работающих генераторов, уменьшается и их суммарная номинальная мощность, например, до величины $P_{н2}$. Если режим электроснабжения оставить прежний, то нормальная работа электрической системы будет осуществляться уже при меньшей частоте $f_{с1}$ системы, так как только при ней будет су-

существовать баланс развиваемой генераторами и потребляемой нагрузкой активных мощностей. Работа электрической системы с пониженной частотой, как было показано, не всегда возможна с технической точки зрения. Кроме того она может быть нецелесообразна и с экономической точки зрения, хотя бы уже потому, что снижение частоты ведет к пропорциональному уменьшению скоростей вращения двигателей, а следовательно и производительности механизмов, приводимых ими в действие, причем в масштабах экономического района, который обслуживает эта электрическая система, то есть, практически всей России. Сохранить работу системы с прежней номинальной частотой $f_{н}$ возможно, если установить второй, а лучше третий (при нем будет “горячий резерв” мощности) режим электроснабжения, соответствующий характеристике нагрузки $P_{н2}$, $P_{н3}$, то есть ввести плановые ограничения на потребление электроэнергии. Такой механизм регулирования генерируемой и потребляемой электрической энергии реализуется в ходе плановой эксплуатации электрической системы. В аварийных же ситуациях когда возникает дефицит генерирующей мощности (отключается один или несколько мощных генераторов) и полностью задействован “горячий резерв” наиболее часто сохраняют частоту системы путем автоматического отключения соответствующей части нагрузки, в первую очередь, неотвечивающей, с помощью устройства автоматической частотной разгрузки (АЧР). Однако в случае неправильной настройки устройства АЧР может создаться ситуация, когда при внезапном аварийном снижении генерирующей мощности, например, до значения $P_{м3}$ устройство АЧР отключит потребителей и уменьшит нагрузку до значений, определяемых характеристикой мощности $P_{м2}$, располагающейся выше характеристики мощности генераторов $P_{з}$. Это приведет к возникновению на валу генераторов избыточного тормозного момента, под действием которого скорость вращения генераторов будет уменьшаться, пропорционально ей будет уменьшаться и частота f_c . А так как ни при какой частоте f_c избыточный момент не исчезнет, процесс будет идти до полной остановки турбогенераторов. Это явление нарушения устойчивости работы электрической системы получило название “лавины частоты” и является тяжелейшей аварией, связанной с полным нарушением электроснабжения. Восстановление нормальной работы электрической системы после такой аварии занимает многие часы.

Изложенное позволяет сделать вывод о решающем влиянии режима электроснабжения на устойчивость электрической системы.

16. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ

Режим короткого замыкания (к.з.) в электрической системе - режим при существовании в ней к.з. Он характеризуется, в частности, видом к.з. и его продолжительностью. Различают четыре основных вида к.з.: однофазное, двухфазное, двухфазное на землю и трехфазное. Продолжительность режима к.з. характеризуется временем, проходящим с момента возникновения к.з. до момента отключения участка электрической сети с к.з. Это время называется временем отключения $t_{отк}$ к.з.

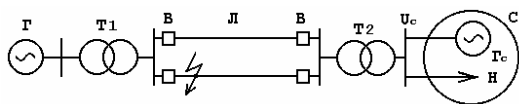


Рис. 16.1

Рассмотрим режим простейшей электрической системы (рис.2.1) при к.з. в точке К в начале одной из цепей ее линии электропередачи Л (рис.16.1). При этом будем считать: мощность приемной системы С бесконечно большая ($U_c = \text{const}$); отключены АРВ у генератора Г ($E_g = \text{const}$) и регулятор турбины ($M_t = \text{const}$);

равны нулю активные сопротивления элементов электрической системы и зарядная мощность линии Л.

При возникновении к.з. в точке К в зависимости от его вида происходит шунтирование одной, двух или трех статорных обмоток генератора Г от ЭДС E_c фаз генератора G_c приемной системы. Это обуславливает уменьшение токов статорных обмоток генератора и определяемой ими индукции ψ_c магнитного поля (рис.2.8), что, в свою очередь, согласно закону Ампера приводит к уменьшению создаваемого генератором электромагнитного момента M , то есть к появлению на валу турбоагрегата избыточного ускоряющего момента $\Delta M = M_t - M$, действие которого может привести к нарушению устойчивости генератора, а значит и электрической системы в целом. Уменьшение электромагнитного момента генератора происходит при любой развиваемой им активной мощности (любом угле δ), что обуславливает расположение характеристики момента $M_{п}$ генератора при к.з. (в аварийном режиме) ниже аналогичной характеристики M_i до к.з. (в нормальном режиме). Очевидно, что при трехфазном к.з. имеет место полное шунтирование статорных обмоток генератора от приемной системы и поэтому генератор не создает никакого электромагнитного момента и его характеристика $M_{п}^{(1)}$ менее всего отличается от характеристики момента $M_{п}$ нормального режима (рис.16.2). Характеристики момента $M_{п}^{(2)}$ и $M_{п}^{(1,1)}$ генератора соответственно при двухфазном и двухфазном на землю к.з. занимают промежуточные положения (рис.16.2).

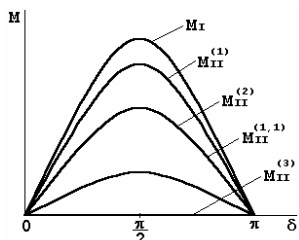


Рис. 16.2

Предположим, что в нормальном режиме момент турбины M_0 . Тогда вызванный к.з. переходный процесс в электрической системе будет аналогичен рассмотренному в разделе 6 пособия переходному процессу в ней при отключении одной цепи линии электропередачи Л и иметь два возможных следствия. Первое - установление нового режима с прежней синхронной скоростью вращения генератора, но с большим значением угла δ_1 (рис.16.3а), то есть сохранение устойчивости генератора. Второе - проворот ротора генератора относительно ротора генератора G_c

приемной системы (увеличение угла δ более чем на 2π), то есть нарушение его устойчивости (рис.16.3б). При этом первое следствие характерно для однофазного к.з., так как существующие нормы требуют обеспечения устойчивости электрической системы при однофазном к.з., а второе следствие может иметь место при любом другом виде к.з., например, двухфазном.

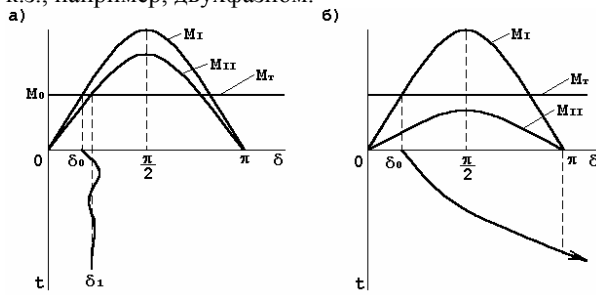


Рис. 16.3

в них не восстанавливаются до значений, имевших место в исходном режиме, вследствие ограничения их большим индуктивным сопротивлением линии электропередачи, равным сопротивлению одной, а не двух параллельных цепей, как это было в исходном режиме. Поэтому характеристика мощности M_{III} генератора в режиме с отключенной цепью линии электропередачи (в послеаварийном режиме) располагается между характеристиками мощности M_t и M_{III} генератора соответственно в нормальном и аварийном режимах (рис.16.4).

В рассматриваемом случае при приведенном на рис.16.4 взаимном расположении характеристик моментов $M_t, M_{III} < M_{III}$ генератора для различных режимов и момента M_t турбины в аварийном режиме (при к.з.) на валу турбоагрегата действует избыточный момент $\Delta M = M_t - M_{III}$ под действием которого генератор ускоряется, что сопровождается прогрессирующим увеличением угла δ (рис.16.4). В момент $t_{отк}$ (при $\delta = \delta_{отк}$) отключения к.з. аварийный режим сменяется послеаварийным, в котором генератор в соответствии с характеристикой момента M_{III} создает больший, чем в аварийном режиме, электромагнитный момент и поэтому на валу турбоагрегата уже действует избыточный момент $\Delta M = M_t - M_{III}$, под действием которого генератор тормозится, что сопровождается замедлением увеличения угла δ . Если при торможении угол δ , достигнув критического значения $\delta_{кр}$, несколько превысит его, то характер избыточного момента сменится на ускоряющий, что вновь приведет к прогрессирующему увеличению угла δ , превышению им значения 2π , означающему проворот ротора генератора Γ относительно ротора генератора Γ_c приемной системы, то есть к потере устойчивости генератором Γ (рис.16.4а). Если отключение к.з. осуществить быстрее, то есть уменьшить $t_{отк}$, то при последующем торможении генератора скорость его вращения может снизиться до синхронной раньше, чем угол δ достигнет критического значения $\delta_{кр}$. Поэтому угол δ , достигнув максимального значения δ_m в дальнейшем будет изменяться вокруг установившегося значения дуги и по завершении переходного процесса станет равным ему (рис.16.4б), то есть скорость вращения генератора восстановится до синхронной, что будет означать сохранение им устойчивости. Возможность обеспечения устойчивости генератора путем уменьшения времени отключения $t_{отк}$ к.з. обусловлена, с одной стороны, уменьшением в результате этого времени ускорения генератора, а потому и запасаемой им при этом дополнительной кинетической энергии и, с другой стороны, увеличением возможного времени торможения генератора (времени от момента отключения к.з. до достижения углом δ критического значения $\delta_{кр}$), в течение которого кинетическая энергия генератора уменьшается. Устойчивость генератора сохраняется в случае, когда запасенная генератором при ускорении дополнительная кинетическая энергия полностью выводится

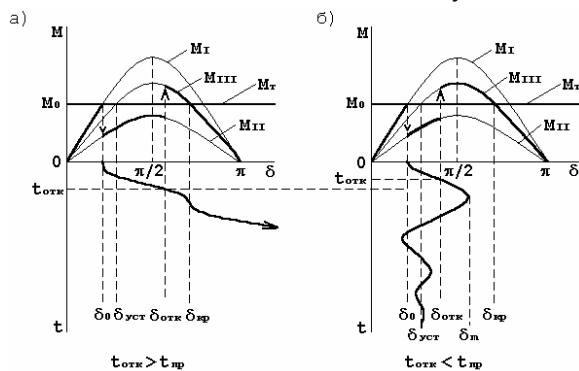


Рис. 16.4

из него при торможении. Это условие осуществимо всегда, так как уменьшая время отключения $t_{отк}$ к.з. можно интервал ускорения генератора, а следовательно и дополнительно запасенную им кинетическую энергию сделать сколь угодно малыми. Поэтому всегда существует некоторое предельное время $t_{пр}$ отключения к.з., - такое, что при отключении к.з. ранее его ($t_{отк} < t_{пр}$) генератор устойчивость сохраняет (рис.16.4б), а при отключении позднее ($t_{отк} > t_{пр}$) - теряет (рис.16.4а). Предельное время $t_{пр}$ отключения к.з. является величиной, определяемой при расчете динамической устойчивости электрической системы. Динамической, потому, что к.з. приводит к большому возмущению режима этой системы.

Ранее было показано, что возможности генератора Γ по созданию электромагнитного момента M_{III} в аварийном режиме зависят от вида к.з. Причем эти возможности при однофазном к.з. больше чем при двухфазном к.з., при двухфазном к.з. больше чем при двухфазном на землю к.з., а при двухфазном на землю к.з. больше чем при трехфазном к.з. (рис.16.2). Поэтому быстрее всего генератор будет разгоняться при трехфазном к.з. и медленнее всего - при однофазном к.з., так как в первом случае ускоряющему моменту M_t турбины не будет никакого противодействия, а во втором случае ему будет противодействовать наибольший электромагнитный момент. Более быстрый разгон генератора означает и более быстрое увеличение его кинетической энергии. Возможности же уменьше-

Изложенные выше рассуждения проведены в предположении, что время существования к.з. не ограничено. В действительности же режим к.з. сопряжен не только с возможностью потери устойчивости электрической системы, но и еще с рядом нежелательных последствий, например, тепловым действием токов к.з. Поэтому продолжительность этого режима, как правило, ограничивают и делают это путем отключения через время $t_{отк}$ участка электрической сети, где возникло к.з. В рассматриваемом случае отключают с двух сторон выключателями В цепь линии Л, на которой возникло к.з. (рис.16.1). В результате прекращается шунтирующее действие к.з. на статорные обмотки, но токи

ния этой энергии после отключения к.з. любого вида одинаковы. Поэтому при трехфазном к.з. кинетическая энергия генератора быстрее достигнет предельного уровня и во избежание его превышения, то есть потери устойчивости генератора, оно должно быть отключено быстрее чем другие виды к.з. Аналогично рассуждая, приходим к выводу, что двухфазное на землю к.з. по критерию устойчивости генератора следует отключить раньше, чем двухфазное к.з., которое, в свою очередь, следует отключить раньше чем однофазное к.з.

Так как величина момента M_t турбины непосредственно определяет ускорение генератора в аварийном режиме, то есть скорость увеличения его кинетической энергии, то очевидно, что сохранение устойчивости более нагруженного активной мощностью генератора при к.з. в электрической системе, требует и более быстрого отключения к.з.

Возникновение к.з. в электрической системе (рис.16.1) может привести не только к потере устойчивости генератора Г, но также и нагрузки Н. Действительно, снимая допущение о постоянстве напряжения U_c на шинах приемной системы, а значит и нагрузки Н, можно заметить, что при к.з. в точке К электрической системы понижаются уровни напряжений в любых ее точках, в том числе, и на нагрузке Н. Снижение же напряжения на нагрузке, как это было показано ранее, может привести к опрокидыванию входящих в ее состав асинхронных двигателей, то есть к потере устойчивости нагрузки. Вероятность такого события возрастает при более близком к нагрузке возникновении к.з., вследствие большей посадки напряжения на ней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем пособии обсуждено влияние наиболее существенных факторов на устойчивость электрической системы. Обсуждение проведено применительно к модели простейшей электрической системы методами качественного анализа с использованием фундаментальных законов физики, оригинальных моделей синхронного генератора и асинхронного двигателя, а также графических средств представления информации.

Приведенные в пособии модели, графики и вводы позволяют вместо детального анализа происходящих в электрической системе процессов мыслить короче и проще. Однако, несмотря на то, что такое мышление требует хорошего знания модели, оно содержит в себе и некоторый риск забыть, что анализируется поведение электрической системы, а не ее модели и графики. Помните же, что модели и графики ничего не значат сами по себе. Они только помогают нам понять, как поступать в той или иной ситуации при проектировании или эксплуатации реальных электрических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: -М.:Высш.шк.,1985.-536 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А.Жукова.-М.:Энергия,1979.-456 с.
3. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.:Наука,1985.-502 с.