

Ю. М. ШАХИЗАРЯН

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ РОТОРОВ ГЕНЕРАТОРОВ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ РЕСИНХРОНИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И СТАНЦИЙ*

Асинхронный ход одного из генераторов, связанных в единую энергетическую систему, сопровождается рядом весьма сложных процессов, вызванных действием на роторы синхронно работающей машины моментом переменной частоты. При очень малых скольжениях частота возмущающей силы должна совпасть, а затем и перейти через значение собственных частот роторов синхронно работающих генераторов. При этом должно наблюдаться явление, получившее название „переход через состояние резонанса“. Это явление имеет место при таких режимах работы генератора в сложной системе, как ресинхронизация, несинхронные АГВ, начальный период выпадения из синхронизма и т. д.

Переход через резонансное состояние обычно сопровождается значительным возрастанием амплитуд колебаний роторов генераторов. Очевидно, что если амплитуды колебаний генераторов, находящихся в синхронизме, превосходят предел динамической устойчивости, то синхронно-работающие агрегаты выпадают из синхронизма. Такая физическая трактовка процессов, связанных с асинхронным ходом и ресинхронизацией генераторов, нуждается в математической проверке.

Обычно при прохождении через резонанс наблюдаются явления, существенно отличные от колебаний при постоянной, установившейся частоте возмущающих сил. А именно, максимум амплитуды имеет место не в момент совпадения частоты возмущающих сил с собственной частотой системы, а позже: максимальная амплитуда меньше, чем резонансная амплитуда при установившихся колебаниях. При этом как смещение, так и снижение максимума амплитуды тем больше, чем быстрее изменяется частота возмущающих сил.

Автором настоящей статьи в [2] рассматривалась задача применительно к электрической системе, состоящей из трех станций, одна из которых находилась в асинхронном режиме и средствами регули-

* В асинхронном режиме может находиться и группа генераторов (станций), эквивалентированных в один эквивалентный. О принципах приближенного эквивалентирования генераторов, находящихся в асинхронном режиме изложено в [1].

рования ресинхронизировалась. При этом приводилась расчетная формула колебания взаимного угла между синхронно-работающими станциями, определяющая устойчивость их работы. Расчеты по проведенной формуле удовлетворительно согласовывались с данными опыта.

Практический интерес представляет распространение полученных результатов на системы со многими степенями свободы.

При асинхронном ходе одной части сложной системы вся оставшаяся оставшаяся часть приходит в колебательное состояние (оставшаяся работать синхронно). При этом после сброса активной мощности асинхронно-работающей части системы происходит перераспределение мощности между синхронно-работающими генераторными станциями. При рассмотрении ресинхронизации в такой системе колебания роторов отдельных синхронно-работающих генераторов могут достичь и превзойти собственную частоту колебаний исследуемой сложной системы. Собственные частоты и соответствующие им амплитуды колебаний могут быть найдены из уравнений свободных колебаний исследуемой сложной системы* [3, 4, 5].

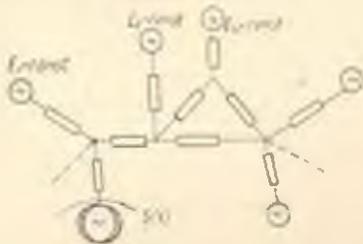


Рис. 1. Принципиальная схема сложной энергосистемы.

Рассмотрим систему, состоящую из M генераторов, n -ый генератор которой работает в асинхронном режиме и средствами регулирования ресинхронизируется (рис. 1). На оставшуюся колеблющуюся систему в течение всего

процесса движения ее в рассматриваемом случае действуют "возмущающиеся силы", зависящие от времени. Уравнения малых колебаний в этом случае будут иметь следующий вид:

$$T_{J1} \frac{d^2 \Delta \delta_1}{dt^2} + P_{d1} \frac{d \Delta \delta_1}{dt} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} \Delta \delta_{13} + \dots + \frac{\partial P}{\partial \delta_{1M}} \Delta \delta_{1M} = \frac{E_1 E_n}{Z_{1n}} \sin [S(t)t + \varphi_1 - \alpha_{1n}] ;$$

$$T_{J2} \frac{d^2 \Delta \delta_2}{dt^2} + P_{d2} \frac{d \Delta \delta_2}{dt} + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} \Delta \delta_{21} + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{23}} \Delta \delta_{23} + \dots + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{2M}} \Delta \delta_{2M} = \frac{E_2 E_n}{Z_{2n}} \sin [S(t)t + \varphi_2 - \alpha_{2n}] ;$$

.....

* Путем подстановки частных решений в виде гармонических колебаний в уравнениях малых свободных колебаний системы приходим к уравнению частот или векторному уравнению, решение которого определяет собственные колебания и амплитуды этих колебаний.

$$\ddot{\delta}_{1M} = \frac{1}{T_{11}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{1M}} - \frac{1}{T_{11}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{1M}}$$

представляют собой относительные ускорения станций, взятых попарно. В системе уравнений (2):

$$P_d^{12} = P_{d1} - P_{d2};$$

$$P_d^{13} = P_{d1} - P_{d3};$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$P_d^{1n} = P_{d1} - P_{dn};$$

$$A_1 = \sqrt{\left(\frac{E_1 E_n}{Z_{1n}}\right)^2 + \left(\frac{E_2 E_n}{Z_{2n}}\right)^2 - 2 \left(\frac{E_1 E_n}{Z_{1n}}\right) \left(\frac{E_2 E_n}{Z_{2n}}\right) \cos(\varphi_2 - \varphi_1 - d_{2n} + d_{1n});}$$

$$\Psi_1 = \text{arc tg} \frac{\frac{E_1 E_n}{Z_{1n}} \sin(\varphi_1 - d_{1n}) - \frac{E_2 E_n}{Z_{2n}} \sin(\varphi_2 - d_{2n})}{\frac{E_1 E_n}{Z_{1n}} \cos(\varphi_1 - d_{1n}) + \frac{E_2 E_n}{Z_{2n}} \cos(\varphi_2 - d_{2n})}.$$

Аналогичными формулами выражаются $A_2, A_1 \dots A_n$ с соответствующей заменой E_2 на $E_1 \dots E_n$.

Решение системы уравнений (2) исследовалось в [2].

Поэтому запишем решение этой системы в окончательном виде [6].

$$\Delta \delta_{1i} = \sum_{l=1}^n Z_l(t) - \sum_{l=1}^n \frac{1}{n_l} \int_{t_0}^t P_l e^{k_l(t-\tau)} e^{-\left(\frac{\sigma_l}{2} - \rho_l\right)\tau} \cos[n_l(t-\tau) + \rho_l] d\tau. \quad (3)$$

В каждом частном случае можно найти значение максимальных амплитуд при прохождении через резонанс соответствующей частоты. При таком исследовании сложным представляется определение рассеивания энергии в рассматриваемой колебательной системе, что может явиться темой самостоятельного изучения. Исследуемую задачу применительно к системе со многими степенями свободы целесообразно решить, используя математические машины дискретного действия.

На математической машине непрерывного действия определялся предельный из условия сохранения устойчивости угол по синхронно-работающей передаче δ_{120} (рис. 2), в зависимости от величины взаимного момента, определяющей величину связи между синхронно и асинхронно-работающими машинами. При фиксированном значении этого угла, скольжение асинхронно-работающего генератора $\Gamma-3$ уменьшалось, до нарушения устойчивости генератора $\Gamma-1$. Расчеты, приведенные для разных соотношений мощностей генераторов системы приведены на рис. 2-6.

Как видно из кривых при сильной связи между генераторами Г-1 и Г-3, увеличение постоянной инерции ресинхронизируемого генератора уменьшает предельный угол по синхронно-работающей

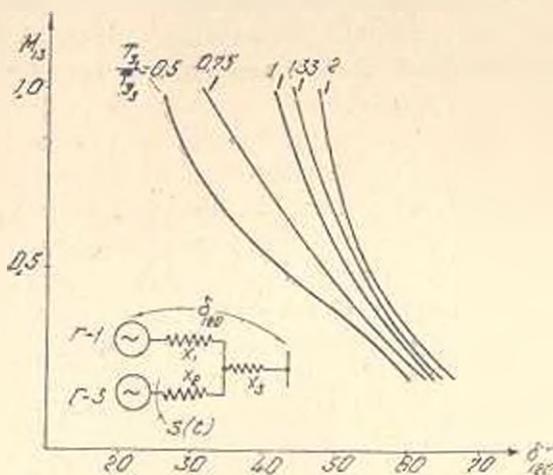


Рис. 2. а) Исследуемая схема. б) Зависимость угла δ_{12} от взаимного момента M_{12} при ресинхронизации генератора Г-3.

передаче. При слабой же связи между генераторами, соотношение постоянных инерций этих генераторов мало влияет на этот предельный угол.

З а к л ю ч е н и е

В настоящей статье проведен предварительный анализ результирующей устойчивости в сложных электрических системах со многими степенями свободы при возможных нестационарных режимах отдельных станций. Делается попытка показать пути исследования нестационарных колебаний роторов генераторов в сложной энергосистеме при возникновении в ней асинхронных режимов.

По изложенной методике вынужденные колебания синхронно-работающих генераторов из-за периодического изменения взаимной синхронной мощности, обусловленной асинхронно-работающим генератором (или группой генераторов), могут вызвать переход роторов отдельных генераторов через состояние резонанса. При этом происходят значительные колебания роторов синхронно-работающих генераторов, которые могут сопровождаться в отдельных случаях нарушением их устойчивости.

Амплитуда колебаний и, следовательно, возможность ресинхронизации будет определяться соотношением мощностей генераторов. (Синхронные компенсаторы, находящиеся в синхронной работе, более резко будут ощущать переход через резонанс из-за их малой постоянной инерции).

Явление прохождения через резонанс принципиально имеет отличие от обычного резонанса, и тем резче сказывается, чем быстрее этот переход. При этом амплитуда резонанса наблюдается не в момент совпадения частот вынуждающей силы с собственной, а значительно позже, что имеет большее значение для объяснения поведения синхронно-работающей энергосистемы при ресинхронизации асинхронно-работающей передачи.

Медленный переход наиболее опасен для синхронно-работающих передач, при этом амплитудные колебания достигают больших величин и поэтому применение средств торможения асинхронно-работающего генератора может значительно уменьшить эти колебания [7]. Применение АРВ сильного типа на генераторах, как показывают экспериментальные резонансные кривые [8] также гасят эти колебания.

Изложенная задача требует дальнейшего изучения и уточнения с использованием математических, физических моделей и их сочетаний. Большую роль при этом сыграют и быстродействующие цифровые машины.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 12. 10. 1963

ՏՈՒ Մ. ՇԻՏՎԱԼԱՐՅԱՆ

ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՌԵՍՏՐՆԵՐԻ ԱՆԿԱՅՈՒՆ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԸ ՐԱՌԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԵՍՏԵՄՆԵՐՈՒՄ՝ ԱՌԱՆՁԿԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԵՎ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԳԵՐԱՍԻՆԿՐՈՆԱՑՈՒՄԱՆ ԳԵՊԻՐՈՒՄ

Ա. Վ. Փ. Ո. Փ. Ն. Վ. Մ.

Հոդվածում իրադրծված է գումարային կայունության նախնական վերլուծումը՝ ազատության բազմաթիվ աստիճաններով բարդ էլեկտրական սխեմաներում՝ առանձին կայանների հնարավոր անկայուն աեժիմների ժամանակ:

Փորձ է արվում ջույց սույա գեներատորների ռոտորների անկայուն տատանումների հետազոտության ուղիները բարդ էներգոսխեմում՝ նրանում տախիստն աեժիմների ձագման գնայրում:

Ճարտարված մեթոդիկայով ջույց է արվում, որ տախիստն աշխատող գեներատորներով (կամ գեներատորների խմբով) պայմանավորված փոխադարձ սխիստն հզորության փոփոխության պատճառով սխիստն աշխատող գեներատորների հարկադիր տատանումները կարող են առաջացնել առանձին գեներատորների ռոտորների սեկանանսային վիճակով անցման երևույթը:

Ընդամին տեղի են ունենում համաժամանակակցված գեներատորների ռոտորների նշանակալից տատանումները, որոնք առանձին գեպերում կարող են ուղեկցվել նրանց կայունության խախտումով:

Տատանումների ամպլիտուդան և, հետևաբար, վերամիաժամանակացման ճարտարությունը, կորոշվի գեներատորների հզորության հարաբերակցությամբ:

Ռեզոնանսի ամպլիտուդան դիտում է ոչ թե սեփականի հետ հարկադրոված ուժի հաճախականության համընկման դահին, այլ նշանակալիորեն ավելի ուշ, որը մեծ նշանակութուն ունի համաժամանակացված վարքի բացատրության համար:

Հողվածում ցույց է տրված, որ սեզոնանսային վիճակով դանդաղ անցուձը սինխրոն աշխատող փոխանցման համար ավելի վտանգավոր է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шахназарян Ю. М., Хэ Ян-цзань. Исследование возможности эквивалентирования синхронных генераторов при асинхронном ходе. Известия, ВУЗ серия „Энергетика“, № 1, 1963.
2. Шахназарян Ю. М. Особенности проверки результирующей устойчивости сложных электрических систем. Известия АН Армянской ССР, т. XV, № 1, 1962.
3. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1948.
4. Бабаков Н. М. Теория колебаний, ГИИТ, 1954.
5. Дабалян А. В. Некоторые колебательные процессы в роторах турбо-и гидротенераторных установок. Труды ВНИИ электромеханики, т. 1, в. 2, 1960.
6. Филиппов А. П. Колебания упругих систем, изд. АН УССР, 1956.
7. Чеваченко В. Ф. Применение электронной вычислительной машины для исследования ре-синхронизации генераторов в сложной электроэнергетической системе. Журн. „Электричество“, № 3, 1962.
8. Савалов С. А., Соколов Н. И. Влияние нарушений режима приемной энергосистемы на устойчивость дальних электропередач. Труды ВНИИЭ IX, Госэнергоиздат, 1959.