

Г. Т. АДОНЦ, Г. А. АЙРАПЕТЯН, Г. Д. АКОПДЖАНЫАН, К. А. ГАМБУРЯН

ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАКАВКАЗСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В СВЯЗИ С ВВОДОМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ МИНГЕЧАУР-АТАРБЕКЯН

В в е д е н и е

В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом проводятся большие работы по объединению энергосистем.

У нас эти работы проводятся по плану создания единой энергосистемы Союза (ЕЭС). В частности, создается объединенная энергосистема трех братских республик Закавказья, как одна из составных частей будущей ЕЭС. В связи с работами по объединению энергосистем возникает ряд актуальных задач по исследованию статической и динамической устойчивости конкретных объединяемых энергосистем.

Кроме предмета исследования, представляют значительный интерес вопросы методов и точности производства расчетов устойчивости. Имеется в виду использование для расчетов устойчивости, кроме математических моделей энергосистем, вычислительных машин дискретного действия (ВМДД). При использовании ВМДД представляет большой интерес формулировка алгоритма расчета устойчивости с учетом динамических характеристик нагрузок энергосистемы.

В настоящей статье излагаются первые результаты исследования статической и динамической устойчивости режимов Закавказской объединенной энергосистемы, связанные с вводом в эксплуатацию межсистемной электропередачи Мингечаур-Атарбекян. Результаты этих исследований относятся к состоянию энергобаланса в системе на уровне 1960 г. Расчеты устойчивости выполнены с помощью модели электросистем 400 герц с 20 генераторными и 200 линейными элементами, сооруженной в Институте электротехники АН Армянской ССР.

В приложении к статье дана формулировка алгоритма расчета с помощью ВМДД динамической устойчивости указанной энергосистемы.

Указанный алгоритм может быть обобщен для энергосистемы другой структуры и энергобаланса.

Рассматриваемые в статье вопросы могут быть использованы в качестве примеров для построения методики расчетов статической и динамической устойчивости других энергосистем.

Методика исследования устойчивости объединения энергосистем определяется главным образом видом и объемом схемы замещения объединенной системы. В общем случае, в схеме замещения объединенной системы, полученной после эквивалентирования ряда ее генераторных станций, нагрузок и линий электропередач, могут оказаться до десятка и более источников эдс и несколько десятков независимых контуров и узлов.

Использование аналитических методов расчета устойчивости для исследования таких систем исключается не только в силу возникающей необходимости производства при этих исследованиях весьма большого числа расчетов, но и в силу очевидности того, что в таких трудоемких расчетах неминуемы ошибки.

Наиболее рациональной оказывается методика исследования, основанная на использовании модели электросистем в сочетании с производством некоторых аналитических расчетов от руки или с помощью вспомогательных вычислительных устройств, или же использование для этих целей ВМДЦ.

1. Схема замещения объединения Закавказских энергосистем

Схемы замещения объединяемых энергосистем, полученные после их эквивалентирования и приведения к напряжению 230 киловольт показаны на рис. 1а (энергосистема Армении—система „А“), на рис. 1б энергосистема Грузии—система „В“ и на рис. 1в энергосистема Азербайджана—система „М“). На рис. 1г показана схема связей этих энергосистем в узле „С“ (Актафинский переключательный пункт), как то видно из рис. 1а—г, схема содержит в себе следующее число эле-

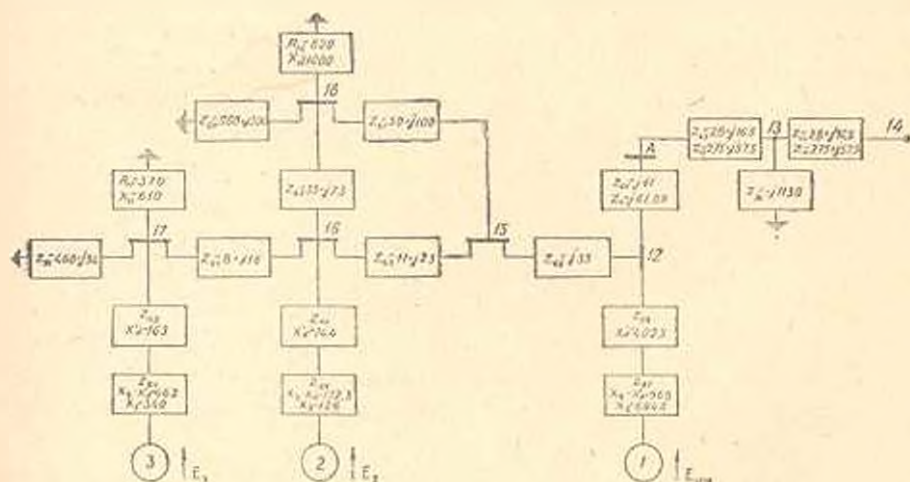


Рис. 1а.

ментов: источников эдс—8; нагрузок—13; поперечных сетевых элементов—5 и ряд других продольных сетевых элементов.

Из числа 8 источников эдс, воспроизводящих эквивалентные ге-

нераторы системы, пять (за №№ 2—6) являются источниками с постоянной по модулю эдс $E_{\text{вн}}$, а три (№№ 1, 7, 8) — источниками с переменной во времени эдс. Из числа 13 пассивных элементов, воспроизводящих эквивалентные нагрузки, 4 (за №№ 18—21) представляются состоящими из последовательно соединенных R и X_L , а 9 (за №№ 9—17) — из параллельно соединенных R и X_L .

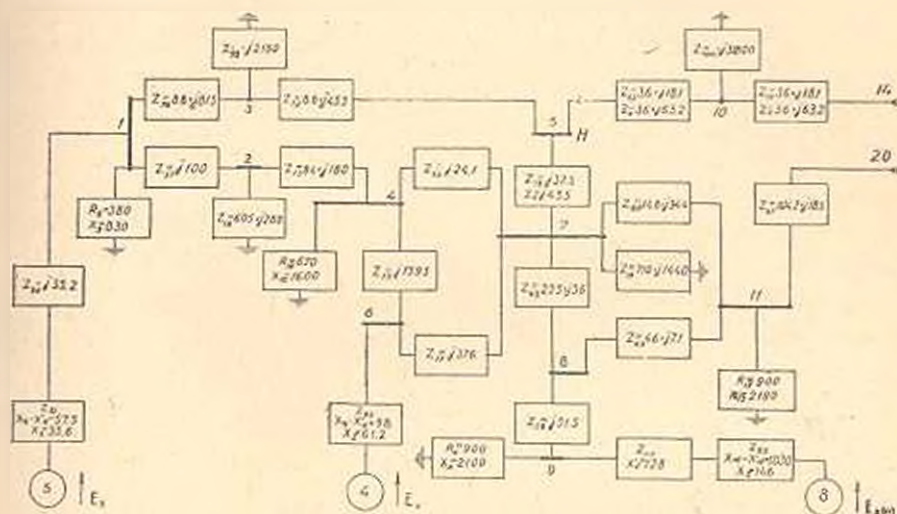


Рис. 16.

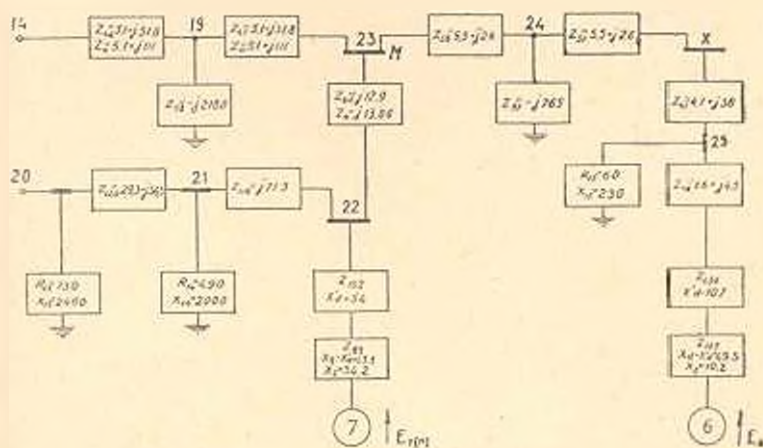


Рис. 17.

Всего в схеме замещения системы вместе с шунтом короткого замыкания содержатся 56 ветвей, образующих независимых 25 узлов и 31 контур. На рис. 1 показаны также эквивалентные сопротивления $Z_{\text{экв}}$, $Z_{\text{вкн}}$ схем замещения сетей обратной и нулевой последовательностей, измеренные из модели из точки короткого замыкания (кз) — места соединения межсистемных связей трех энергосистем (узел „С“).

Параметры этих элементов схемы замещения даны в относительных единицах с учетом масштаба модели.

Эквивалентные гидрогенераторы за №№ 1-5 и 7 представляются параметрами X_e , X_d' , а турбогенераторы за №№ 6 и 8 — параметрами X_d , X_d'' .

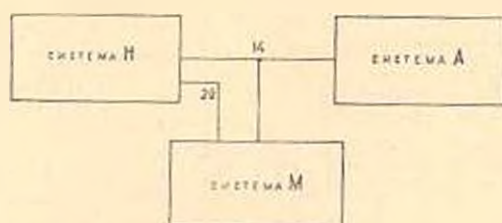


Рис. 1г.

Параметры Z_1 , Z_2 , Z_3 линий электропередач, трансформаторов и нагрузок, использованные при построении сетей трех последовательностей, также показаны на рис. 1. При этом, для случая $Z_2 = Z_1$ принято обозначение Z с индексом номера элемента схемы. Для нагрузочных элементов принято $Z_0 = (0,35 \div 0,4) Z_1$.

II. Порядок расчета статической устойчивости электропередачи по межсистемным связям

Наибольший практический интерес представляет вопрос о пределах мощности, передаваемой по межсистемным связям в некотором предельном режиме, и оценка меры устойчивости (K_p) по отношению разности предельной (расчетной) мощности ($P_{пр}$) и мощности (P) в нормальном (исходном) режиме электропередачи по данной межсистемной связи

$$K_p = \frac{P_{пр} - P}{P}, \quad (1)$$

где $P_{пр}$ и P — мощности на шинах подстанций приемной энергосистемы в предельном и нормальном режимах.

Формула (1) рекомендована Комиссией по дальним электропередам Энергетического института им. Г. М. Кржижановского АН СССР.

Проверка устойчивости по второй из рекомендуемых той-же Комиссией формул, а именно:

$$K_u = \frac{U - U_{пр}}{U}, \quad (2)$$

где $U_{пр}$ и U — напряжение на шинах подстанции приемной энергосистемы, соответственно, в предельном и нормальном режимах. показала, что значение K_u находится в пределах от 0 до 0,14. Очевидно, что нарушения статической устойчивости по причине снижения напря-

жения (случаи $K_n > 0,1$) в отдельных узлах нагрузок могут быть предотвращены путем установки соответствующих компенсаторов-генераторов реактивной мощности.

Таким образом, для оценки статической устойчивости по мощности необходимо определить параметры двух установившихся режимов—нормального и предельного.

Нормальный (исходный) режим электропередачи по данной межсистемной связи, статическая устойчивость которой исследуется, задается на модели путем подбора режимов на генераторных элементах системы. Определяются значения напряжения, активной и реактивной мощностей на зажимах генераторов, нагрузок и межсистемных линий электропередачи, а также значение E_d за переходным сопротивлением генераторов.

Предельный режим электропередачи находится путем поворота ротора отправной станции до достижения на шинах приемной энергосистемы максимальной величины активной мощности, передаваемой по данной межсистемной линии электропередачи.

Если при этом, отдаваемая отправной станцией, окажется больше ее установленной мощности, то в таком случае она уменьшается до пределов установленной, за счет передачи мощности от других станций отправной энергосистемы.

Таким образом, одним из условий достижения предельного режима является обеспечение мощности станций отправной энергосистемы в пределах их установленных. Вторым условием достижения предельного режима служит восстановление на всех генераторах энергосистемы соответствующих значений E_d исходного, нормального режима.

С целью обеспечения выполнения первого из указанных условий оказывается необходимым снизить величину передаваемой в приемную энергосистему мощности.

Параметры схем, замещающих нагрузки в предельном режиме, определяются по статическим характеристикам нагрузок в зависимости от уровней напряжения на их зажимах.

III. Результаты расчета статической устойчивости электропередачи по межсистемным связям

В расчетах статической устойчивости по схеме рис. 1 принимались в качестве отправной станции—источник эдс 7, отправной энергосистемы—система „М“.

Приемными служили: система с источниками эдс 1, 2 и 3 (система „А“) и система с источниками 4, 5 и 8 (система „Н“). Соответственно, в качестве межсистемных электропередач служили ЛЭП: между узлами М—С в качестве отправной, между узлами С—А и С—Н в качестве приемных. Связь между узлами 11 и 22 является весьма слабой и особого влияния на расчеты не оказывала.

Результаты расчета, точнее, результаты измерений параметров нормального (исходного) и предельного установившихся режимов представлены в форме таблиц: 1, 2 и 3.

В этих таблицах даны: углы (δ), продольная составляющая эдс за переходным сопротивлением (E_d), активная (P), реактивная (Q) мощности и напряжения (U) на зажимах всех генераторов системы: а также величины P , Q , U на ЛЭП, представляющих межсистемные связи, измеренные на зажимах приемных энергосистем и отправного генератора.

Согласно таблице 1, при установленной мощности отправной системы, равной 12,4 единиц модели, в предельном режиме передается в систему „А“ —1,05 единиц и в систему „Н“ —0,91 единицы против мощностей, соответственно, 0,70 и 0,50, передаваемых в эти системы в нормальном режиме.

Таблица 1

Режим	Генераторы и ЛЭП	Генераторы								ЛЭП между узлами		
		1	2	3	4	5	6	7	8	С—Н	С—А	М—Х
Нормальн.	δ	356,2	334	331,5	323	8,8	10,5	345,8	350,8			
	E_d	55	55,5	50	47	48,5	45,4	57,8	46,7			
	P	0,55	1,78	0,58	0,90	2,60	8,20	2,90	0,56	0,50	0,70	
	Q	0,21	1,30	0,42	1,02	1,20	1,08	1,16	0,505			
	U	47,9	46,8	44,0	47,8	48,2	48,8	49,6	44,4			
Предельн.	δ	356,2	334	331,5	323	8,8	27	8,5	350,8			
	E_d	55	55,5	50	47	48,5	45,4	57,8	46,7			
	P	0,46	1,59	0,535	0,70	2,24	8,7	3,7	0,43	0,91	1,05	0,08
	Q	0,235	1,46	0,50	0,13	1,06	1,19	1,02	0,50	0,30	—0,22	—0,87
	U	47	46,8	44,3	48,8	47,7	48,7	49,6	43,4	45	45,8	46,3

При этом максимальная мощность устанавливалась на зажимах „А“ электропередачи „С—А“.

Согласно таблице 2, при почти полном использовании мощности (12,2 единицы модели) отправной системы „М“, в предельном режиме передается в систему „А“ —1,8 единиц, против мощности 0,61 единицы, передаваемой в нормальном режиме. В этом случае межсистемная связь „С—Н“ была отключена, т. е. система „Н“ работала вне объединения.

Согласно таблице 3, воспроизводящей данные режима передачи энергии из системы „Н“ в систему „А“ при отключенной межсистемной связи „С—М“, в предельном режиме система „А“ получает 1,33 единицы активной мощности против 0,69 единицы в нормальном режиме электропередачи.

Таблица 2

Режим	Генераторы и ЛЭП	Г е н е р а т о р ы					ЛЭП между узлами	
		1	2	3	6	7	С—А	М—Х
Нормальн.	δ	356.2	334	331.5	349.4	340.1		
	E_2	55	55.6	50	45.4	57.8		
	P	0.625	1.88	0.745	7.33	3.47	0.61	1.0
	Q	0.18	1.1	0.365	0.97	0.74	0.215	1.03
Пределы.	U	51	48.7	46.2	48.3	52	52	47.5
	δ	356.2	334	331.5	59.8	39.3		
	E_2	55	55.6	50	45.4	57.8		
	P	0.2	0.8	0.375	8.5	3.7	1.8	-0.15
	Q	0.285	1.67	0.525	1.25	1.18	-0.1	0.82
	U	43	43.5	41	48	48.7	41.8	45

Таблица 3

Режим	Генераторы и ЛЭП	Г е н е р а т о р ы						ЛЭП между узлами	
		1	2	3	4	5	6	С—Н	С—А
Нормальн.	δ	352	335.7	326.6	14.0	11.0	324		
	E_2	54.4	53.6	50.2	47	40.8	54.8		
	P	0.44	1.67	0.52	3.4	1.54	0.12	-0.72	0.69
	Q	0.25	1.18	0.45	1.37	0.37	0.97	-0.75	-0.275
Пределы.	U	45.4	45.0	42.3	48.0	43.0	43.7	43.5	44.7
	δ	352	335.7	326.5	49	52.5	19.5		
	E_2	54.4	53.6	50.2	47	40.8	54.8		
	P	0.25	1.10	0.40	3.40	1.65	0.70	-1.46	1.33
	Q	0.34	1.52	0.55	1.6	0.62	1.04	-0.40	-0.72
	U	41.8	43.0	40.5	47.0	43.0	44.0	38.5	41.0

IV. Порядок расчета динамической устойчивости

Расчет динамической устойчивости режимов сложной электросистемы, выполняемый с использованием модели, сводится к производству ряда последовательных операций, соответствующих определяемым дискретными значениями времени, наприм.р. 0; 0.05; 0.1 и т. д. секундам времени динамического процесса, начиная с момента короткого замыкания.

Для каждого из этих моментов времени на модели воспроизводится определенный установившийся режим, параметры которого из-

меряются и принимаются соответствующими заданным дискретным значениям времени. Приращения между параметрами реализуемых на модели установившихся режимов для данного момента времени и предшествующего момента вычисляются по формулам приращений.

Более конкретно, расчеты динамической устойчивости выполняются с использованием модели в следующем порядке:

а) после набора на модели пассивной части схемы замещения системы (рис. 1) в параметрах, соответствующих прямой последовательности чередования фаз, устанавливается режим источников эдс так, чтобы добиться заданных перетоков мощности по межсистемным связям и генерируемых мощностей самих источников эдс. Измеренные на модели (на зажимах: источников эдс, нагрузок и ЛЭП) параметры полученного режима фиксируются как соответствующие моменту времени $t \leq 0$ сек;

б) в точке схемы, соответствующей месту короткого замыкания (кз), включается шунт из $Z_{2\text{кз}}$ и $Z_{0\text{кз}}$, воспроизводящий данный вид кз. Восстанавливаются величины E_d , за переходными сопротивлениями источников эдс, что означает соблюдение принципа постоянства потокоцепления синхронных генераторов системы. Измеренные параметры фиксируются как соответствующие моменту времени $t > 0$ сек

в) по результатам измерений на модели параметров установившегося режима вычисляются приращения: активной мощности, углов, продольной составляющей эдс за переходным сопротивлением генераторов, а также приращения активных и реактивных сопротивлений для ряда нагрузочных элементов;

г) полученные в результате расчета приращения вносятся в схему, что означает воспроизведение на статической модели перехода от состояния при $t > 0$ к состоянию при следующем дискретном значении t переходного процесса, например, $t = 0.05$ сек;

д) измеряются параметры нового установившегося режима, представляющего собою состояние динамического процесса в данное дискретное значение t ;

е) описанные выше операции: измерение режимов, вычисление приращений, внесение их в модель, измерение новых режимов и т. д. повторяются n -кратно.

Результаты измерений углов, мощностей, напряжений и других параметров режимов генераторов, нагрузок, ЛЭП представляются как функции дискретных значений t , по которым и судят об устойчивости динамического перехода системы с момента возникновения короткого замыкания в одной из точек системы до наступления нового установившегося режима после отключения участка сети, содержащего точку короткого замыкания;

ж) приращения продольной составляющей эдс за переходным сопротивлением для источника с переменной эдс вычисляются по

формулам (II-7) с использованием также формул (II-5) и (II-6), приведенных в приложении к статье.

Приращения активной мощности и роторных углов всех генераторов вычисляются по приводимым там-же формулам (II-10) и (II-12) с одновременным использованием формул (II-11);

з) приращения скольжений асинхронных двигателей определяются по характеристикам соответствующих нагрузок, воспроизводящим функцию

$$\Delta \sigma_{H(n)} = \varphi \left[\frac{U_{H(n)}}{U_{H(0)}}, t \right], \quad (3)$$

где H — индекс нагрузки;

n — индекс номера дискретного значения t .

Для моментов kz и отключения участка с kz в формулу (3) подставляются значения $U_{H(n)}$, соответствующие $t > 0$ и $t > t_{kn}$:

и) значения $R_{H(n+1)}$, $X_{H(n+1)}$ для каждой переменной нагрузки для $n+1$ -го интервала определяются в зависимости от значений напряжений на зажимах двигателя для n -го номера дискретного значения t .

V. Результаты расчета динамической устойчивости объединения трех энергосистем

Наиболее неблагоприятным местом аварийного нарушения нормального режима принят узел "С" — точка соединения межсистемных связей трех энергосистем. В расчете принимается, что в этом узле имеет место двухфазное короткое замыкание на землю, продолжительностью 0,20 сек, против 0,18 сек, рекомендуемых Комиссией дальних электропередач для рассматриваемого напряжения передачи.

Результаты расчета представлены в форме кривых $\delta_r(t)$ генераторных углов в функции времени, начиная с момента короткого замыкания, по закону изменения которых оценивается устойчивость или неустойчивость режимов: электропередачи по межсистемным связям, отдельных энергосистем и объединения в целом.

В таблице 4 приводятся величины $E_{dec(n)}$, $E_{acc(n)}$, $P_{dec(n)}$, $\delta_{(0)}$ для всех (S) генераторов в нормальном режиме.

В таблице 5 приводятся данные нормального (исходного) режима и параметров нагрузок при $t < 0$. Таким образом, в таблицах 4 и 5 приводятся т. н. начальные условия задачи по расчету устойчивости. На рис. 2, 3, 4 представлены результаты расчета для случаев передачи в нормальном (исходном) режиме по межсистемным связям следующих заданных мощностей: 1,25 (по ЛЭП „М—С“), 0,2 (по ЛЭП „М—Х“), 0,5 (по ЛЭП „С—Н“) и 0,7 (по ЛЭП „С—А“).

Данные о нормальном (исходном) режиме генераторов приводятся в столбцах 2-5 таблицы 4. Данные рис. 2 соответствуют случаю,

Таблица 4

Данные нормального (исходного) режима генераторов при $t \leq 0$

Генераторы	$E_{dex}(0)$	$E'_{d3}(0)$	$\delta_s(0)$	$P_N(0-)$
1	2	3	4	5
1	98,9	55	356,2	0,52
2	85,8	55,5	334	1,72
3	77,1	50	331,5	0,665
4	57,6	47	323	0,745
5	57,1	48,5	8,8	2,34
6	78,8	45,4	10,5	8,52
7	62,3	57,8	345,8	3,07
8	115	46,7	350,8	0,535

Таблица 5

Данные нормального (исходного) режимов и параметров нагрузок при $t \leq 0$

№№ нагрузок	$R_N(0)$	$X_N(0)$	$Z_N(0)$	$P_N(0-)$
1	2	3	4	5
9	380	830	0,014	1,28
10	670	1600	0,014	0,66
11	900	2100	0,014	0,53
12	900	2190	0,014	0,475
13	730	2400	0,014	0,616
14	490	2000	0,014	1,05
15	50	230	0,014	7,45
16	620	1080	0,014	0,73
17	370	610	0,014	1,29

когда через 0,2 сек после КЗ отключается межсистемная связь „С—Н“, в результате чего отделяется от объединения система „Н“ со своими источниками эдс за №№ 4, 5, 8.

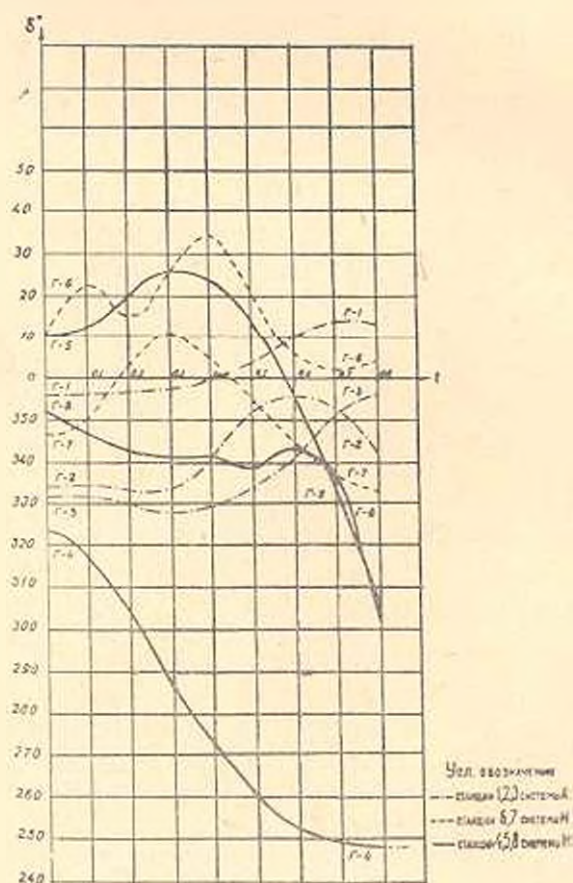


Рис. 2.

Данные рис. 3 соответствуют случаю, когда через 0,2 сек после кз отключается межсистемная связь „С—А“, в результате чего отделяется от объединения система „А“ со своими источниками эдс за №№ 1, 2, 3.

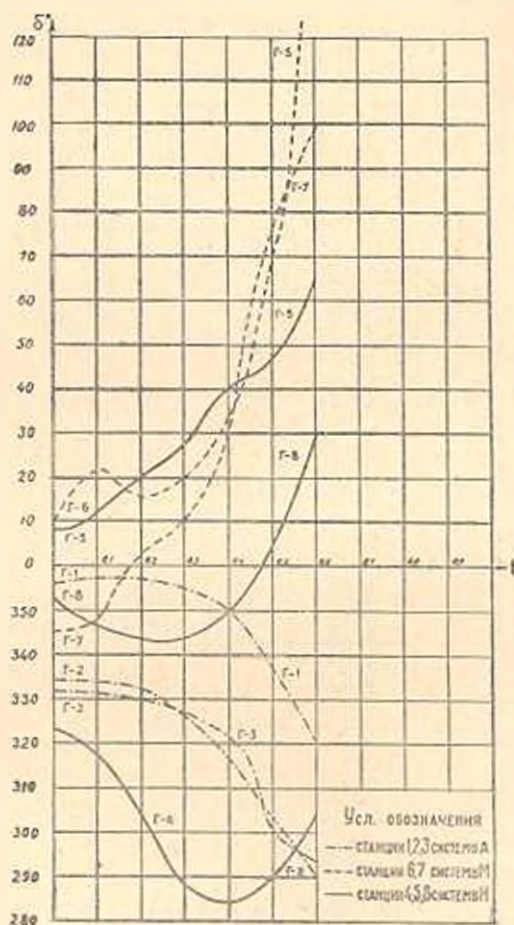


Рис. 3.

Данные рис. 4 соответствуют случаю, когда через 0,2 сек после кз. отключается межсистемная связь „С—М“, в результате чего отделяется от объединения система „М“ со своими источниками за №№ 6, 7.

Из кривых $\delta_i(t)$, представленных на этих рисунках видно, что относительные углы генераторов отделившейся и оставшейся частей объединения порознь во всех трех случаях приобретают тенденцию к сближению, т. е. динамический переход от исходного режима (табл. 4) к послеаварийному является устойчивым.

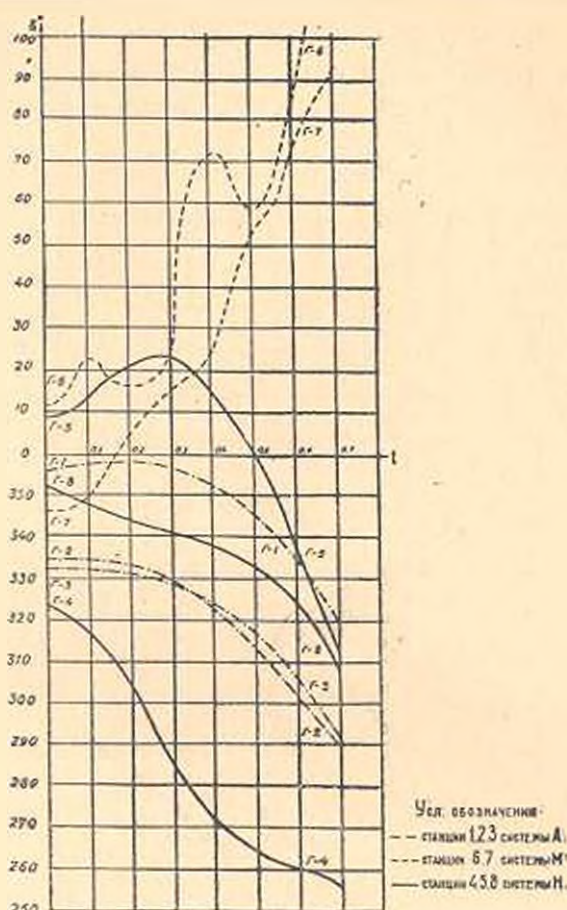


Рис. 4.

VI. Об использовании ВМДД для расчетов динамической устойчивости

В связи с большим распространением ВМДД и возможностями их широкого использования для расчетов режимов энергосистем, например, расчетов потокораспределения, устойчивости, экономических режимов и др., возникает необходимость формулировки алгоритма решения с помощью ВМДД ряда таких задач.

В частности, для решения задачи расчета динамической устойчивости энергосистемы сложной структуры (например, системы рассматриваемой в настоящей статье), с помощью ВМДД, необходима формулировка алгоритма по ряду соображений. В их числе можно указать на следующие:

а) сопоставление результатов расчетов, выполненных с помощью модели и ВМДД, с целью получения оценки точности расчетов устойчивости сложных систем на модели;

б) оценка вопроса о совместном использовании МСНТ и ВМДД, вплоть до их сопряжения;

в) разработка вспомогательного вычислительного устройства к МСПТ для автоматизации расчетов устойчивости;

г) разработка требований к ВМДЛ, специализированной для расчетов режимов энергосистем.

В приложении приводится в качестве примера формулировка алгоритма решения рассматриваемой в статье задачи устойчивости с числовыми параметрами уравнений, соответствующими схеме замещения по рис. 1.

Приложение

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВМДЛ ЗАДАЧИ О ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ СХемой ЗАМЕЩЕНИЯ (Рис. 1)

Ниже приводится состав расчетных уравнений и порядок их использования для расчетов динамической устойчивости системы, представленной в качестве примера схемой замещения по рис. 1, с учетом динамических характеристик нагрузок за №№ 9-17. Уравнения, необходимые для расчета устойчивости сложной системы, могут быть разбиты на четыре группы, а именно, уравнения, описывающие процессы: 1) в электрических сетях объединенной системы; 2) в электромагнитных контурах эквивалентных генераторов; 3) в узлах нагрузок системы и 4) процессы, связанные с колебаниями роторных углов генераторов. В результате совместного решения уравнений динамического перехода системы получаются зависимости ряда величин (роторных углов, скольжения асинхронных нагрузок, ЭДС генераторов и др.) от времени.

Для совместного решения уравнений принимается метод последовательных интервалов, идея которого заключается в следующем: по заданным начальным условиям вычисляются приращения исследуемых переменных величин за некоторый промежуток времени $\Delta t = \text{const}$. Полученные в результате этого расчета величины (значения при $t=0$ плюс приращение) принимаются в качестве новых начальных условий, используемых для вычисления приращений, соответствующих промежутку времени $2\Delta t$ и т. д. Путем циклического повторения расчетов находятся значения всех искомых переменных величин за n промежутков времени, т. е. время t представляется как $n \cdot \Delta t$, где n — число интервалов.

Взамен записи переменных и функции времени t принимается запись, в форме индекса, зависимости переменной величины от значения n . Например $\delta_{s(n)}$, $E_{ds(n)}$, $P_{s(n)}$ и т. д., где s — индекс станций системы, n — индекс функций времени (интервала расчета).

Начальные условия задачи задаются для времени $t \leq 0$, что соответствует моменту, предшествующему короткому замыканию. Далее, определяются значения при $n=0$, т. е. $t \geq 0$, что будет соответ-

ствовать моменту начала короткого замыкания. Принимая интервал $\Delta t = 0,05 \text{ сек}$, получим для случая $n = 4$ ($t = 0,2 \text{ сек}$) два значения искоемых переменных, соответствующие одно — (n_4^-) моменту окончания режима короткого замыкания, второе — (n_4^+) моменту после отключения короткого замыкания. Значения переменных при $n > 4$ будут соответствовать послеаварийному режиму. В качестве начальных условий задачи по расчету динамической устойчивости задаются следующие параметры режима, предшествующего короткому замыканию, т. е. соответствующие времени $t \leq 0$: $E_{d1(0)}, E_{d2(0)}, \delta_{1(0)}, P_{s(0-1)}, R_{11(0)}, X_{11(0)}, \varepsilon_{11(0)}, P_{11(0-1)}$, где $s = 1 \div 8, H = 9 \div 17$. В частности, значения указанных начальных условий приводятся в таблицах 4 и 5.

1. Уравнения, описывающие процессы в электрических сетях

Расчетные уравнения, описывающие процессы в сетях с момента короткого замыкания, т. е. $t \geq 0$ получаются согласно методу контурных токов и имеют следующий вид:

$$[Z_{cs(n)}] [\dot{I}_c] = [E_{s(n)}], \quad [c, s = 1, 2 \dots 31], \quad (11-1)$$

где $\dot{I}_c$ — комплексные контурные токи. Для значений $c = 1 \div 22$ $\dot{I}_c$ представляют собою токи в ветвях схемы по рис. 1.

$E_{s(n)}$ — комплексные эдс, зависящие от времени, где:

$$\dot{E}_{sn} = \begin{cases} 0 & \text{при } s \geq g \\ \dot{E}_{sn} = E_{ds(0)} < \dot{q}_{s(n)} & \text{при } s = 2 \div 6. \end{cases}$$

В качестве примера ниже приводятся некоторые из элементов матрицы $[Z_{cs(n)}]$:

а) Диагональные элементы:

$$Z_{1,1} = 2,8 + j 318$$

$$Z_{2,2} = 13,8 - j 920,1$$

$$Z_{3,3} = 21,8 - j 815,5$$

$$Z_{4,4} = 8,8 - j 1721$$

$$Z_{5,5} = 8,8 - j 2963,3, \text{ и т. д.}$$

$Z_{11(n)} (H = 9 \div 17)$ вычисляется по формуле (11-21).

б) Недиагональные элементы:

$$1. Z_{1(2, 3, 16, 17, 20, 21)} = -2,8 + j 1052,5 \quad Z_{1(20, 10)} = j 1130.$$

$$2. Z_{1(4, 17, 21)} = -13,8 + j 994,5 \quad Z_{2(16, 20)} = -2,8 + j 1017,5 \quad Z_{2,26} = -14 - j 23 \quad Z_{2(23, 21)} = Z_{1,23}.$$

$$3. Z_{3,16} = Z_{2,16} \quad Z_{3(29,31)} = -21,8 + j 978,5 \quad Z_{3,26} = Z_{2,16} \quad Z_{3,26} = \\ = Z_{2,26} \quad Z_{3(29,30)} = Z_{1,29}.$$

$$4. Z_{1(9,10,12)} = j 2180 \quad Z_{1(9,11,12,13,19,25)} = -j 37,5 \quad Z_{4,23} = -j 376 \\ Z_{4,21} = -8,8 - j 83 \quad Z_{4,28} = -8,8 + j 2134,5.$$

$$5. Z_{5(9,16,19)} = -8,8 + j 2098,5 \quad Z_{5,21} = -8,8 - j 81,5 \quad Z_{5,29} = Z_{4,5}.$$

С момента отключения короткого замыкания, т. е. с $t > 0,2$ сек соответствующего послеаварийному режиму, на матрицу $[Z_{cs(n)}]$ налагаются следующие дополнительные условия:

а) для случая отключения межсистемной связи „С—Н“ приобретают значения ∞ следующие диагональные элементы: $Z_{22,22}$, $Z_{25,25}$, $Z_{28,28}$, $Z_{29,29}$, что обращает в нуль следующие контурные токи: I_{22} , I_{25} , I_{28} , I_{29} ;

б) для случая отключения межсистемной связи „С—А“ оказываются равными ∞ диагональные элементы и соответственно равными нулю контурные токи с индексами: 22, 29, 30;

в) для случая отключения межсистемной связи „С—М“, соответственно: 22, 25, 30, 31.

Для расчета динамической устойчивости нет необходимости полностью решать систему уравнений (II-1) относительно токов I_{cs} . Оказываются вполне достаточными вычисления в каждом из интервалов определителя $\Delta_{cs(n)}$ матрицы $[Z_{cs(n)}]$ и ряда ее алгебраических дополнений, для которых примем обозначение $\Delta_{cs(n)}$, где c и s — индексы вычеркиваемых при его получении столбцов и строк матрицы $[Z_{cs(n)}]$. В частности, необходимо вычислять в каждом из интервалов n следующие две группы алгебраических дополнений:

а) для расчета электромагнитных процессов и активной мощности восьми генераторов $\Delta_{cs(n)}$ ($c, s = 1 \div 8$).

б) для расчета напряжений на зажимах нагрузок

$$\Delta_{Hs(n)} \quad (H = 9 \div 17; \quad s = 1 \div 8).$$

По данным этих величин вычисляются для каждого из значений n следующие комплексные сопротивления:

$$Z_{cs(n)} = \frac{\Delta_{cs(n)}}{\Delta_{cs(n)}}; \quad Z_{Hs(n)} = \frac{\Delta_{Hs(n)}}{\Delta_{Hs(n)}} \\ (c, s = 1 \div 8) \quad (s = 1 \div 8; \quad H = 9 \div 17). \quad (\text{II-2})$$

Вычисляются также модули этих величин и аргументы первых из них, а именно:

$$Z_{cs(n)} = \left| \frac{\Delta_{cs(n)}}{\Delta_{cs(n)}} \right| \quad Z_{Hs(n)} = \left| \frac{\Delta_{Hs(n)}}{\Delta_{Hs(n)}} \right|$$

(II-3)

$$\varphi_{cs}(n) = \text{Arg} \frac{\dot{\Delta}_{cs}(n)}{\dot{\Delta}_{cs}(n)}$$

2. Уравнения, описывающие процессы в электромагнитных контурах эквивалентных генераторов

Начиная с $n=0$, по известным величинам: $E_{ds(n)}$, $Z_{cs(n)}$, $\varphi_{cs(n)}$, $\dot{\Delta}_{cs}(n) = \dot{\Delta}_c(n) - \dot{\Delta}_s(n)$, $x_s - x_{ds}$ (согласно схеме по рис. 1) вычисляются по приводимой ниже системе формул $E_{s(n)}$ для трех генераторов $s=1, 7, 8$, представленных переменными эдс, т. е. зависящими от n

$$\frac{E_{ds(n)}}{x_{qs} - x_{ds}} = \frac{E_s(n)}{x_{qs} - x_{ds}} - \sum_{c=1}^8 \frac{E_{cs(n)}}{Z_{cs(n)}} \sin(\delta_{cs(n)} + \varphi_{cs(n)}) \quad (s=1, 7, 8). \quad (\text{II-4})$$

Для остальных генераторов ($s=2 \div 6$), как было отмечено выше, принимаются постоянные величины модулей эдс, а именно:

$$E_s = E_{ds(n)} = E_{ds(0)}$$

По величинам $E_s(n)$ и $E_{ds(n)}$ вычисляются продольные эдс $E_{ds(n)}$ за синхронным реактансом x_{ds} для генераторов 1, 7.

$$E_{ds(n)} = [E_s(n) \cdot (x_{ds} - x_{ds}') - E_{ds(n)}' (x_{ds} - x_{qs})] \frac{1}{x_{qs} - x_{ds}} \quad (s=1, 7) \quad (\text{II-5})$$

Для генератора $s=8$ принимается $E_{ds(n)} = E_{ds(0)}$. Если окажется, что для генераторов $s=1, 7, 8$ $\frac{U_{s(n)}}{U_{s(0)}} = \frac{1}{U_{s(0)}} \cdot x_{qs} \sum_{c=1}^8 \frac{E_{cs(n)}}{Z_{cs(n)}} \leq 0,85$,

то вычисляются по следующей формуле изменения эдс генераторов, связанные с вводом в действие схемы форсировки возбуждения

$$E_{ds(n+1)} = E_{ds(n)} \cdot \left[1 + (K_\Phi - 1) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(n+1)\Delta t}{T_{cs}}} \right) \right] \quad (s=1, 7, 8). \quad (\text{II-6})$$

где $T_{cs} = 0,65$ — постоянная времени цепи возбуждения возбудителя;

$\Delta t = 0,05$ — продолжительность интервала расчета;

$K_\Phi = 1,7$ — коэффициент форсировки возбуждения.

Вычисляются также

$$\Delta E_{ds(n+1)} = \frac{\Delta t}{T_{ds}} \cdot (E_{ds(n+1)} - E_{ds(n)}) \quad (\text{II-7})$$

$$E_{ds(n+1)} = E_{ds(n)} + \Delta E_{ds(n+1)} \quad (s=1, 7, 8). \quad (\text{II-8})$$

Величины $E_{ds(n+1)}$ и $E_{ds(n+1)}$ используются в качестве начальных условий для следующего $(n+1)$ интервала расчета устойчивости.

3. Уравнения, описывающие электромеханические процессы в генераторах

Вычисляются активные мощности генераторов для n интервалов, начиная с $n = 0$ (для $t \geq 0$)

$$P_{s(n)} = \frac{E_s^2}{Z_{ss(n)}} \cos \varphi_{s(n)} - E_s(n) \cdot \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq s}}^8 \frac{E_r(n)}{Z_{sr(n)}} \cos (\delta_{sr(n)} + \varphi_{sr(n)}). \quad (11-9)$$

Вычисляются приращения мощностей $P_{s(n)}$ относительно мощности $P_{s(0-)}$, соответствующей $t < 0$ (см. табл. 4).

$$\Delta P_{s(n)} = P_{s(n)} - P_{s(0-)}, \quad (s = 1 \div 8). \quad (11-10)$$

Для интервалов $n = 0$ ($t = 0$) и $n = 4$ ($t = t_{\text{от}} = 0,2$ сек) принимаются следующие полусуммы мощностей:

$$P_{s(0)} = \frac{1}{2} [P_{s(0-)} + P_{s(0+)}],$$

$$P_{s(4)} = \frac{1}{2} [P_{s(4-)} + P_{s(4+)}], \quad (11-11)$$

где $P_{s(0-)}$ соответствует $t < 0$, а $P_{s(0+)} - t \geq 0$.

$P_{s(4-)}$ соответствует началу окончания кз, а

$P_{s(4+)}$ соответствует началу послеаварийного режима, т. е. моменту начала после отключения кз.

Вычисляются приращения роторных углов

$$\Delta \delta_{s(n+1)} = \Delta \delta_{s(n)} + K_s \cdot \Delta P_{s(n)}, \quad (11-12)$$

где K_s — коэффициенты, величины которых равны

$$15 \text{ для } s = 1, 2, 3, 4, 5, 7 \text{ и } 30 \text{ для } s = 6, 8.$$

Вычисляются новые значения роторных углов, которые принимаются в качестве начальных условий для следующих интервалов расчета

$$\delta_{s(n+1)} = \delta_{s(n)} + \Delta \delta_{s(n+1)}. \quad (11-13)$$

4. Уравнения, описывающие процессы в узлах нагрузок системы

Вычисляются для каждой из нагрузок ($H = 9 \div 17$) величины напряжений за каждый интервал (n) относительно напряжения на зажимах соответствующих нагрузок в момент времени $t < 0$, т. е. при $n = 0$.

$$U_{H(n)} = \frac{1}{U_{H(0-)}} \cdot Z_{H(n)} \cdot \sum_{s=1}^8 Z_{Hs(n)} E_s(n) \quad (H = 9 \div 17) \quad (11-14)$$

Вычисляются мощности нагрузок $H = 9 \div 17$

$$P_{H(n)} = \frac{A_H \cdot U_{H(n)}^2}{s_{Hk}^2 + s_{H(n)}^2} \cdot s_{Hk} \cdot s_{H(n)}, \quad (11-15)$$

где s_{Hk} — критическое скольжение эквивалентного асинхронного двигателя данного H -го узла нагрузок;

$s_{H(n)}$ — скольжение того же двигателя в начале данного интервала времени;

A_H — величина постоянная, определяемая на основе той же формулы по данным для времени $t \leq 0$, т. е. для $n = 0$

$$P_{H(0)} = \frac{A_H \cdot U_{H(0)}^2}{s_{Hk}^2 + 0,02} \cdot s_{Hk} \cdot 0,02, \quad (11-16)$$

где $P_{H(0)}$, s_{Hk} , $U_{H(0)}$ являются известными.

Вычисляются приращения мощностей за данный интервал времени относительно мощности при $t \leq 0$.

$$\Delta P_{H(n)} = P_{H(n)} - P_{H(0)} \quad (H = 9 \div 17). \quad (11-17)$$

Вычисляются приращения скольжений за интервал

$$\Delta s_{H(n+1)} = \Delta s_{H(n)} + \Delta P_{H(n)} \frac{1}{M_H}, \quad (11-18)$$

где M_H — постоянная инерция эквивалентного асинхронного агрегата.

Вычисляются новые значения скольжения эквивалентного двигателя

$$s_{H(n+1)} = s_{H(n)} + \Delta s_{H(n+1)}. \quad (11-19)$$

Вычисляются коэффициенты изменения активных и реактивных сопротивлений нагрузок в функции новых значений скольжений

$$K_{H(n+1)} = f_r(s_{H(n+1)}), \quad K_{XH(n+1)} = f_X(s_{H(n+1)}), \quad (11-20)$$

где f_r , f_X — задаются таблицей, полученной по схеме замещения асинхронного двигателя.

Вычисляются новые значения $Z_{H(n+1)}$, являющиеся слагаемыми диагональных элементов матриц $Z_{cs(n)}$ для следующего интервала расчета

$$Z_{H(n+1)} = jK_{HH(n)} \cdot K_{XH(n)} \cdot \frac{R_{H(n)} \cdot X_{H(n)}}{K_{HH(n-1)} \cdot R_{H(0)} + jK_{XH(n-1)} \cdot X_{H(0)}}, \quad (11-21)$$

$H = 9 \div 17$,

где $R_{H(0)}$, $X_{H(0)}$ — задаются начальными условиями задачи и приводятся в таблице 5.

Полученные значения $Z_{H(n+1)}$, $s_{H(n+1)}$ используются в качестве начальных условий для следующего интервала расчета.

Ա. Տ. ԱԳՈՆՑ, Գ. Ո. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Գ. Գ. ՀԱԿՈԲՅԱՆՍԿԱՆ, Գ. Հ. ԴԱՄՈՒԻՐՅԱՆ

ԱՆԴՐՈՎԿԱՍՅԱՆ ԷՆԵՐԳՈՍԻՍՏԵՄԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ,
ԿԱՊԻԼԱԾ ՄԻՆԳԵԶՈՒՎ-ԱՐԽԱՐԵԿՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈԶԱՎՈՐԿՈՒՄԸ
ԳԾԻ ՇԱՀԱԳՈՐԾՄԱՆ ՀԱՆՁՆԵԼՈՒ ՀԵՏ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Վերջին ժամանակներս մեծ աշխատանք է տարվում Մոսկվայի էներգոսիստեմի առաջնության միջոցով էներգոսիստեմի առաջնության ուղղությամբ: Այդ կապակցությամբ մի շարք հարցեր են առաջանում, որոնք բխում են միջախառնմային կապերի ստատիկական և դինամիկական կայունության ապահովման պայմաններից:

Հոգվածում շարադրված են Անդրկովկասյան միացյալ էներգոսիստեմի աշխատանքային ռեժիմների ստատիկական և դինամիկական կայունության հետազոտությունների առաջին արդյունքները, կապված Մինդեշտուր-Աթաբեկյան միջախառնմային էլեկտրահաղորդման զծի շահագործման հանձնարարության հետ: Հետազոտությունները կատարված են Հոգվածում ՄԱՄ Դիտարկյունների ակադեմիայի էլեկտրատեխնիկայի ինստիտուտում կատարված 400 հարց հաճախականության փոփոխական հոսանքի ցանցերի մոդելի օգնությամբ: Շարադրված են փոփոխական հոսանքի մոդելի օգնությամբ ստատիկական և դինամիկական կայունության հաշվման մեթոդները:

Անդրկովկասյան միացյալ էներգոսիստեմի աշխատանքային ռեժիմների ստատիկական կայունությունը ուսումնասիրելիս որոշվել են ուղղակի էներգոսիստեմից (միջախառնմային կապի դմբով) զեպի լնդանոց էներգոսիստեմները հաղորդվող հզորության սահմանային արժեքները, ելնելով ուղղակի էներգոսիստեմի հնարավորություններից:

Հետազոտությունների արդյունքները բերված են № 1, 2, 3 աղյուսակներում, որտեղից երևում է, որ Աղսաաֆա-Աթաբեկյան միջախառնմային կապի զծով զեպի Հալկական էներգոսիստեմ կարելի է հաղորդել նախատեսված 0,7 միավոր հզորության փոխարեն այնպիսի մեծ հզորություններ— մինչև 1,05 միավոր: Այդ պեպքում Աղսաաֆա-Նույթյուզ զծով զեպի Վրացական էներգոսիստեմ կարելի է հաղորդել 0,7—0,9 միավոր հզորությամբ:

Միացյալ էներգոսիստեմի աշխատանքի ռեժիմների դինամիկական կայունության ուսումնասիրությունը կատարվել է այն զեպի համար, երբ կարճ միացումը տեղի է ունեցել երեք էներգոսիստեմների միացման հանգույցում (երկֆազ կարճ միացում հոգի հետ): Կարճ միացումը նշված հանգույցում հանդիսանում է փոփոխարկվող զեպերից մեկը դինամիկական կայունության ապահովման տեսանկյունից: Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ բոլոր երեք էներգոսիստեմներն էլ աշխատում են դինամիկորեն կայուն (տեղ. 2—3), երբ միավորի ենթարկված հաղորդման զիծը անջատվում է կարճ միացումից 0,2 վրկ հետո:

Հոգվածում հետադրվում է նաև զիսկրետ զործողության հաշվիչ մեքենայի օգտագործման հարցը էլեկտրական փաստանների դինամիկական կայունության հաշվման համար:

Համակարգում բերված է զիսկրեա դործողություն հաշվիչ մեքենայի օգնությամբ դինամիկ կալուենության հաշվման ալգորիթմի ձևակերպումը հետազոտվող էներգոսխառների համար: Ատադված ալգորիթմը կարելի է ընդհանրացնել նաև այլ կառուցվածքի էներգոսխառների դինամիկ կալուենության հաշվման համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Жданов Н. С. Устойчивость электрических систем. ГЭИ, 1948.
2. Маркович Н. М. Режимы электрических систем. ГЭИ, 1957.