

Магистрант ЭФ О.Т.Мовлонов.
науч. рук. д.т.н., проф. К.Р.Аллаев, ТашГТУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА В КВАДРАТИЧНОЙ ФОРМЕ

В статье приведен один из матричных методов анализа статической устойчивости электрических систем функция Ляпунова в квадратичной форме, позволяющая сделать выводы о пределе работы синхронных генераторов по условиям устойчивости. При этом ниже приведены результаты сравнения анализа статической устойчивости исследуемой ЭЭС при совместном использовании узловых уравнений и функций Ляпунова в квадратичной форме с результатами, полученными по предлагаемой методике с применением промышленной программы СТАТУС.

The article presents one of the matrix methods of analysis of static stability of electric systems a Lyapunov function in a quadratic form allowing to draw conclusions about the limit of operation of synchronous generators for stability conditions. The results of comparison of the static stability analysis of the EES under study in the joint use of node equations and Lyapunov functions in quadratic form with the results obtained by the STATUS industrial program are given below.

Bu maqolada kvadratlik shakildagi Lyapunov funksiyasi orqali murakkab elektr tizimining statik turg'unligini taxlil qilishda matematik tenglashtirish usulidan foydalanilgan bulib, bu usul turg'unlik chegarasini ruxsat etilgan qiymatni aniqlashda sinxiron generatorning ishlash chegarasini oshirish orqali aniqlanadi. Bundan tashqari pastda kursatilgan natijalarda EET ning statik turg'unlik chegarasini taxlil qilishda kvadratlik shakildagi Lyapunov funksiyasini matematik usuldan foydalanib natijalar olib borilib, STATUC dasturi asosida sanoatda qullangan.

Одной из основных задач теории управления является изучение динамических процессов, происходящих в автоматических системах, каковыми являются электроэнергетических систем (ЭЭС). Системы управления при нормальной эксплуатации должны поддерживать вполне определенные режимы работы объектов энергетики вне зависимости от действующих на них возмущающих воздействий [1].

Устойчивость ЭЭС при малых возмущениях означает, что малые изменения параметров режима или какого-нибудь возмущения начальных условий не приведут к значительным отклонениям режимных параметров [2,3].

Методы исследования статической устойчивости с учетом самораскачивания сложны, поэтому достаточно надежные результаты могут быть получены при строгом математическом описании системы регулирования управляемых объектов, с использованием их достоверных параметров и характеристик [1-2].

При исследовании статической устойчивости сложных ЭЭС сначала производится расчет установившегося режима на основе уравнений узловых напряжений [2], определяется напряжение для каждого узла U_k и ее аргумент δ и далее для каждого j -го генератора, с использованием этих данных проверяется положительность первого, главного минора q_{1j} матрицы квадратичной формы Q . Тем самым определяется генератор, который быстрее всех приближается к своему пределу устойчивости при данном утяжелении. По существу исследование устойчивости в «малом» сложной ЭЭС предлагаемым методом превращается в исследование схемы «генератор-шины».

Как отмечено выше, предлагаемый метод, т.е. совместное использование узловых уравнений и функций Ляпунова в квадратичной форме, имеет ряд преимуществ по сравнению с другими, применяемыми на практике методами анализа статической устойчивости: простота алгоритма, легкость моделирования регулирующих устройств генераторов, возможность проверки и по необходимым, и по достаточным условиям устойчивости, их совместимость с известными промышленными программами расчета установившихся режимов и статической устойчивости сложных ЭЭС [2].

Проведенные расчеты ЭЭС разной сложности подтверждают сказанное.

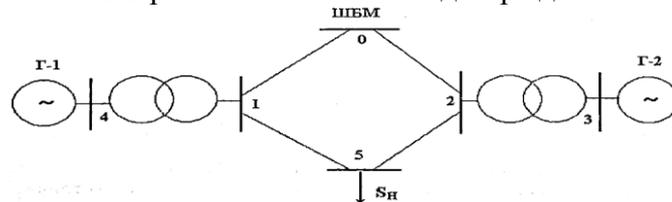


Рис.1. Эквивалентная схема двухгенераторной ЭЭС

На рис.2 приведены результаты расчета статической устойчивости шестиузловой двухгенераторной электроэнергетической системы (рис.1).

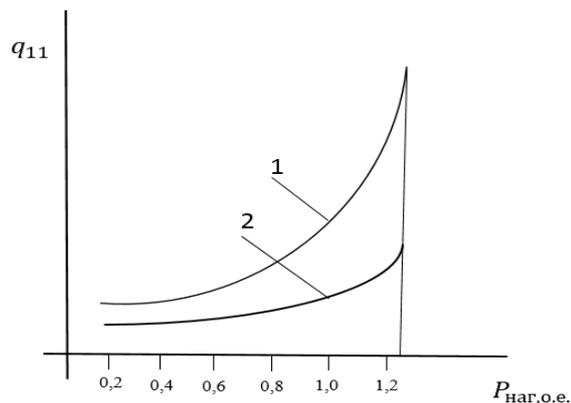


Рис.2. Характер изменения первого минора для Г-1 и Г-2

Для наглядности получаемых результатов параметры линий электропередач, связывающих генераторы с балансирующим узлом, трансформаторы и параметры обоих генераторов, включая коэффициенты усиления АРВ и статические характеристики турбин, подобраны одинаковыми: $S_{Г1} = S_{Г2} = 235 \text{ МВ}$, $U_{ГН1} = U_{ГН2} = 15,75 \text{ кВ}$, $T_{j1} = T_{j2} = 5,6 \text{ с}$, $X_{d1} = X_{d2} = 2,11$, $X'_{d1} = X'_{d2} = 0,272$, $X''_{d1} = X''_{d2} = 0,18$, $T'_{1d0} = T'_{2d0} = 7 \text{ с}$, $U_{фном} = 440 \text{ В}$, $I_{фхх} = 920 \text{ А}$, $I_{фном} = 1635 \text{ А}$, $L_{1-5} = 50 \text{ КМ}$, $L_{2-5} = 250 \text{ КМ}$, $L_{0-1} = L_{2-0} = 300 \text{ КМ}$, $S_H = 650 \text{ МВА}$, $\cos\varphi = 0,8$.

Различие в режимах работы генераторов объясняется только разными длинами линий. Утяжеление режима производится постепенным увеличением мощности нагрузки в узле 5. Из-за большей удаленности от узла нагрузки генератор Г-2 нагружается меньше и первый элемент матрицы квадратичной формы Ляпунова q_{11} , характеризующий степень его устойчивости, возрастает медленно, что является признаком наличия большого запаса устойчивости (кривая 2).

Близость от узла нагрузки заставляет Г-1 нагружаться больше (как известно, при идентичности остальных параметров нагрузка распределяется обратно пропорционально сопротивлениям ЛЭП между генераторами и нагрузкой), и поэтому первый генератор быстрее

приближается к предельному режиму и по этой причине крутизна кривой 1 больше [3].

Для сопоставления различных программ анализа устойчивости электроэнергетических систем обычно рассчитывают четырнадцати-узловую тестовую схему, содержащую 5 электрических станций (рис.3). Генераторы (Г-1) - (Г-4) схемы эквивалентируют две группы машин станций, работающих на шины 500 и 220 кВ. Г-5 представляет собой синхронный компенсатор, а станция Г-6 принята в качестве балансирующей. Генераторы Г-1 и Г-2 оснащены АРВ пропорционального типа, а остальные унифицированными АРВ сильного действия. Параметры генераторов, эквивалентных станций и сети тестовой схемы приведены в табл. 1-2.

Ниже приведены результаты сравнения анализа статической устойчивости исследуемой ЭЭС при совместном использовании узловых уравнений и функций Ляпунова в квадратичной форме с результатами, полученными промышленной программой СТАТУС.

Для каждого значения мощности рассчитывается установившийся режим, и проверяется положительность квадратичной формы Ляпунова для всех генераторных узлов. Утяжеление продолжается до выхода из синхронизма какого-либо генератора. На рис.4(а) приведены результаты расчетов при следующей настройке АРВ генераторов Г-3,Г-4: $K_{0U}=10$ е.в./е.напр., $K_{1U}=2,8$ е.в./е.напр., $K_{2U}=1,25$ е.в./е.напр.

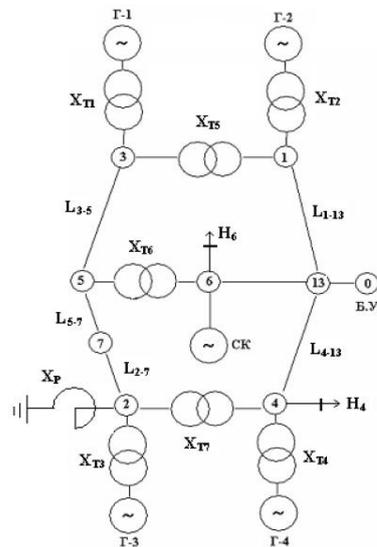


Рис. 3. Тестовая схема «Энергосетьпроект»

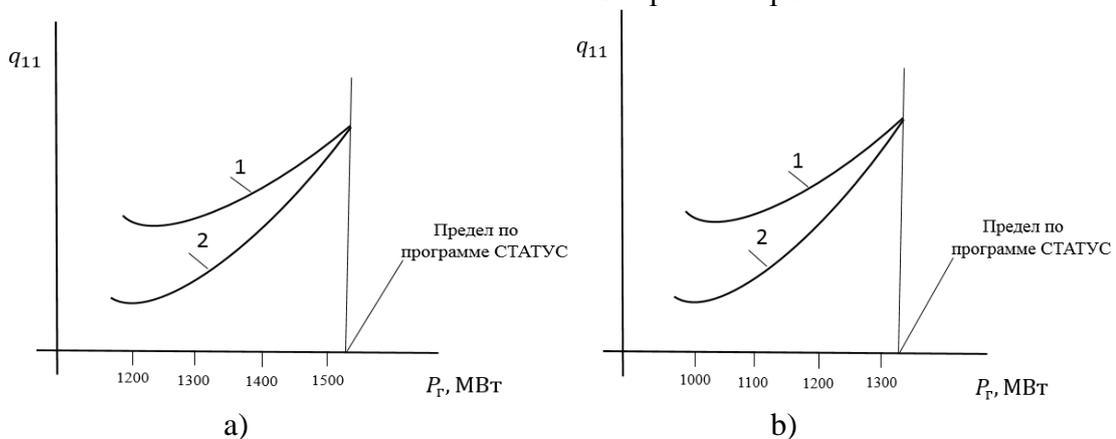


Рис. 4. Результаты сравнения расчета пределов статической устойчивости по предлагаемой методике с применением программы СТАТУС

При приближении к предельному по устойчивости режиму кривая первого минора квадратичной формы Ляпунова q_{11} для станции Г-4 резко возрастает и при нарушении устойчивости его значение становится отрицательным. При этом q_{11} для станции Г-3, мощность которой больше, чем у Г-4, но нагружена одинаково с нею, возрастает незначительно.

Установлено, что результаты, полученные совместным использованием узловых уравнений и метода функций Ляпунова в квадратичной форме и на основе промышленной программы СТАТУС совпадают только в случае определения границ апериодической устойчивости при условии, что в системе нарушение колебательной устойчивости исключено. Если такая вероятность имеется, то предлагаемый метод позволяет определить границы самораскачивания для каждого генератора или же эквивалентной станции ЭЭС.

Таблица 1

Параметры тестовой схемы

Генераторы							
Генератора, $N_{\underline{=}}^0$	P_n МВт	S_n МВА	X_d о.е.	X_q о.е.	X'_d о.е.	T_{d0} с.	T_j с.
Г-1	200	235	1,88	1,88	0,225	6,38	7,0
Г-2	200	235	1,88	1,88	0,225	6,38	7,0
Г-3	300	353	1,70	1,7	0,260	5,9	6,4
Г-4	300	353	1,70	1,7	0,260	5,9	6,4
СК	-	160	2,0	1,3	0,434	8,5	2,8

Таблица 2

Параметры тестовой схемы

Электрические станции					
Генератора, $N_{\underline{=}}^0$	Кол., агр. шт.	$P_{\Sigma Г}$, МВт	$S_{\Sigma Г}$, МВА	$P_{ген}$ МВт	$U_{ген}$ КВ
1	2	400	470	400	15,7
2	2	400	470	400	15,7
3	5	1500	1765	1280	20
4	4	1200	1412	1280	20
5	2	-	320	-	10

На рис.4(b) приведены кривые изменения q_n генераторов Г-3 и Г-4 при $K_{0U} = 20$ ед., $K_{1U} = 2,8$ ед., $K_{2U} = 1,25$ ед.

Как видно из рисунка, в этом случае предел по устойчивости системы уменьшается, что говорит о неоптимальном значении коэффициентов АРВ.

Разработанная на основе предложенной методики программа позволяет настроить регуляторы так, чтобы обеспечивалась как колебательная, так и апериодическая устойчивость исследуемой системы.

Параметры тестовой схемы

Элементы ЭЭС				
Линии	Трансформаторы	Нагрузки I	Реактор	СК
Ом	Ом	МВА	Ом	Ом
$L_{3-5} = 4,65 + j44,9$ $L_{1-13} = 8 + j60$ $L_{5-7} = 6,71 + j90$ $L_{2-7} = 16,71 + j90$ $L_{4-13} = 6,5 + j41$	$X_{T1} = j43 \text{ Ом}$ $X_{T2} = 12,8 \text{ Ом}$ $X_{T5} = j31,2 \text{ Ом}$ $X_{T3} = j0.0382 \text{ о.е.}$ $X_{T4} = j0.0826 \text{ о.е.}$ $X_{T6} = 15,6 \text{ Ом}$ $X_{T7} = j15,7 \text{ Ом}$	$H_6 = 1000 + j100$ $H_{13} = 2000 + j600$ $H_4 = 520 - j275$	$X_P = j1560$	$X_T = j4,6$

Проведен анализ статической устойчивости западной части ОЭС Центральной Азии. В качестве балансирующего узла приняты шины Сырдаринской ТЭС.

Замечательные свойства функций Ляпунова в квадратичной форме позволяют однозначно определить станцию или генератор, режим которой приближается к пределу статической устойчивости по мере утяжеления режима. А совместное использование уравнений узловых напряжений и функций Ляпунова в квадратичной форме.

Литература

1. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Матричные методы анализа малых колебаний электрических систем. - Тью.: «Fan technology», 2016. - 432 с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 3-е, перераб. - М.: Высшая школа, 1984. - 415 с.
3. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. Под. ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенов. - М.: Издательство, 2000. - 648 с.

Мовлонов Т.О. Определение предела статической устойчивости сложных электрических систем на основе функции Ляпунова в квадратичной форме.

Мовлонов Т.О. Kvadrat shakldagi Lyapunov funktsiyasi orqali murakkab elektr tizimining statik turg'unlik chegarasini taxlil qilish.

Movlonov T.O. Determination of the limit of static stability of complex electrical systems based on the Lyapunov function in quadratic form.

Сведения об авторах:

Магистрант ЭФ гр.89М-16 О.Т. Мовлонов.

Республика Узбекистан, г. Ташкент 700095, ул. Университетская 2, Таш ГТУ

Тел. моб: (+99897) 464 – 56 – 36

Науч. руководитель: д.т.н., проф. К.Р.Аллаев, ТашГТУ