

УДК 681.5-621.22

## АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

А.С. Кадыров

Проанализирована статическая устойчивость энергосистемы Кыргызской Республики на примере энергосистемы Нарынских ГЭС с учетом реальных перетоков по ВЛ-220 кВ. Выявлены условия существенного повышения их эффективности и надежности.

*Ключевые слова:* электроэнергетические системы; статическая устойчивость; критическое напряжение.

## STATIC STABILITY ANALYSIS OF THE POWER SYSTEM OF THE KYRGYZ REPUBLIC

A.S. Kadyrov

This article analyzes the static stability of the electric power system of the Kyrgyz Republic on the example of the Naryn GESov energy system, based on actual HV-220kV flows. The conditions for substantial increase of their efficiency and reliability are revealed.

*Keywords:* electric power systems; static stability; critical tension.

Энергосистема (ЭЭС) Кыргызстана достаточно велика: она включает 14 узлов, 154 расчетных узлов связи и 13 эквивалентных генераторов. Но из-за несоординированной токовой загрузки элементов сети и уровней напряжения в расчетных узлах сети Юга Кыргызской энергосистемы она выдает ограниченную мощность. Рассмотрим статическую устойчивость и связи станций каскада Нарынских ГЭС: Курпсайской, Ташкумырской, Шамалдысайской ГЭС и ПС Кристалл, которая осуществляется через ВЛ-220 кВ (таблица 1, рисунок 1):

- Курпсай ГЭС – Торобаева (2хАС-300,  
 $I_n = 1350 \text{ А}, P_n = 540 \text{ МВт}$ );
- Кристалл – Кызыл-Рават (АС-300,  
 $I_n = 1350 \text{ А}, P_n = 540 \text{ МВт}$ );
- Кристалл – Сардор (АС-400,  
 $I_n = 388 \text{ А}, P_n = 155,2 \text{ МВт}$ );
- Кристалл – Юлдуз (АС-400,  
 $I_n = 667 \text{ А}, P_n = 266,8 \text{ МВт}$ ).

Расчеты выполнялись для максимальных часов нагрузки зимних суток, при фактической суммарной располагаемой мощности ГЭС, которая составляет 1490 МВт. При очень большом потреблении электроэнергии, превышающем допустимую мощность, большая ее часть около (80–85 %) из-за отсутствия на своей территории генерирующих мощностей, передается в энергосистему Узбекистана по ВЛ-220 кВ «Кристалл-Юлдуз», по ВЛ-220 кВ «Кристалл-Кы-

зыл-Рават» и ВЛ-220 кВ «Кристалл-Сардор». До 16,5 % передается в энергосистему Казахстана и не более 2 % – в энергосистему Таджикистана. Переток электроэнергии в соседние энергосистемы достаточно стабильно находится на уровне (9,3÷9,5) млрд кВт·ч в год, при этом среднемесячные значения перетоков составляют (0,7÷0,8) млрд кВт·ч. А из соседних энергосистем в энергосистему Кыргызстана в последние годы поступает около 6,0÷6,5 млрд кВт·ч (58÷64 %) через энергосистему Казахстана, не более 4 % – из энергосистемы Таджикистана и 34÷37 % – из энергосистемы Узбекистана [1].

Рассмотрим статическую устойчивость станций Юга Кыргызстана. Из-за перегруза ВЛ «Кристалл-Юлдуз» происходило ее аварийное отключение с последующими набросами мощностей, и нарушением устойчивости на остающихся в работе остальных ВЛ-220 кВ. С вводом гидроагрегата на Камбар-Атинской ГЭС-2 с вырабатываемой мощностью 90 МВт и подключенной к энергоузлу при суммарной установленной мощности станциями 1580 МВт и новой установкой ПС «Датка» 500/220 кВ с протягиванием двухцепной ВЛ-220 кВ «Кристалл-Датка», Курпсай ГЭС-Датка, ВЛ-220 кВ «Датка-Торобаева-1», ВЛ-220 кВ «Датка-Торобаева-2», эта проблема была устранена:

- Кристалл – Датка (2-цепной АС-400,  
 $P_n = 178 \text{ МВт}, I_n = 445 \text{ А}$ );

Таблица 1 – Основные действующие электростанции ЭЭС Кыргызстана

Электростанция	Установленная мощность, МВт	Располагаемая мощность, МВт	Средне-статическая выработка электроэнергии, млрд кВт*ч
Токтогульская ГЭС	1200	1200	4,1
Курпсайская ГЭС	800	800	2,6
Ташкумырская ГЭС	450	450	1,5
Шамалдысайская ГЭС	240	240	0,91

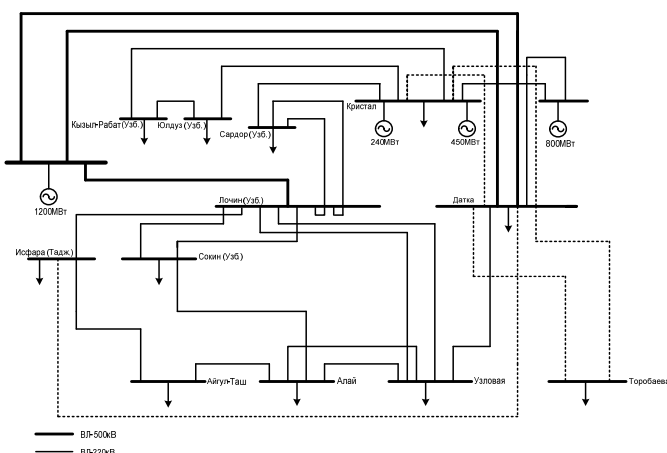


Рисунок 1 – Упрощенная схема замещения ВЛ 220 кВ и выше ЭЭС Кыргызстана

- Курпсайская ГЭС – Датка (АС-400,  $P_H = 475\text{ МВт}$ ,  $I_H = 1188\text{ А}$ );
- Датка – Торобаева-1 (АС-300,  $P_H = 200\text{ МВт}$ ,  $I_H = 500\text{ А}$ );
- Датка – Торобаева-2 (АС-300,  $P_H = 257\text{ МВт}$ ,  $I_H = 643\text{ А}$ ).

Анализ роли отдельных составляющих ЭЭС, исходя из характеристик отдельных физических связей (ВЛ различных классов напряжений), трудно осуществить, если использовать схему большой размерности. Поэтому исходная схема замещения должна быть приведена в соответствие с работами [2, 3], что позволит существенно снизить размерность исследуемой энергосистемы. Рассматриваемый ниже способ эквивалентирования (рисунок 2) целесообразен для решения задач повышения пропускной способности системообразующих связей, оценки статической аperiodической устойчивости энергообъединений.

Статическая устойчивость характеризуется коэффициентом запаса мощности  $P$  в контролируемой связи или по напряжению  $U$  узла:

$$K_p = \frac{(P_{\max} - P)}{P}, \quad K_U = \frac{(U - U_{kp})}{U}, \quad (1)$$

где  $P$ ,  $U$  – мощность и напряжение в исходном режиме;  $P_{\max}$ ,  $U_{kp}$  – предельная мощность и критическое напряжение по условиям статической устой-

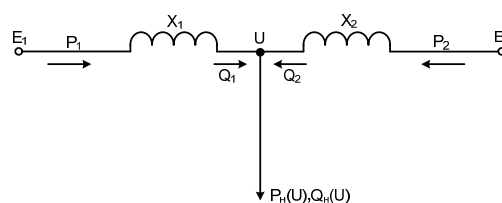


Рисунок 2 – Эквивалентная трехузловая схема

чивости;  $K_p$ ,  $K_U$  – коэффициенты запаса устойчивости по соответствующим параметрам.

Энергосистема представлена схемой замещения, которая содержит два эквивалентных генератора, работающих через линии электропередачи на узел нагрузки (рисунок 2). Параметры схемы замещения и исходного режима (в относительных единицах) следующие:  $x_1 = 0,735$ ;  $x_2 = 0,694$ ;  $\tau_{j1} = 5\text{ с}$ ;  $\tau_{j2} = 8\text{ с}$ ;  $E_{10} = 1,54$ ;  $\angle 28,5^\circ$ ;  $E_{20} = 1,69$ ;  $\angle 28,1^\circ$ ;  $U_0 = 1$ ;  $S_{10} = 1 + j 0,485$ ;  $S_{20} = 1,3 + j 0,615$ ;  $S_{H0} = 2,3 + j 1,1$  (таблица 2). Нагрузка задана статическими характеристиками при базисных величинах.

Таблица 2 – Статические характеристики величин

U	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,775
$P_H$	2,30	2,23	2,16	2,105	2,045	2,025
$Q_H$	1,10	1,035	0,985	0,946	0,952	0,990

Требуется определить запас устойчивости по напряжению узловой точки для заданного режима энергосистемы.

Решение. Запас устойчивости определяется по выражению (1).

1. Для определения критического значения напряжения узловой точки  $U_{kp}$  воспользуемся упрощенным методом с применением критерия  $\frac{dE_1}{dU} > 0$ .

С этой целью для ряда значений  $U$  рассчитываем зависимость

$$E_1 = f_1(U) = \sqrt{\left(U + \frac{Q_1 x_1}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_1 x_1}{U}\right)^2}, \quad (2)$$

где

$$Q_1 = Q_n - Q_2;$$

$$Q_2 = \sqrt{\left(\frac{E_2 U}{x_2}\right)^2 - P_2^2} - \frac{U^2}{x_2}; \quad (3)$$

$$P_1 = P_{10} + (P_n - P_{10}) \frac{\tau_{J1}}{\tau_{J1} + \tau_{J2}};$$

$$P_2 = P_{20} + (P_n - P_{20}) \frac{\tau_{J2}}{\tau_{J1} + \tau_{J2}}. \quad (4)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов  $E_1, P_1, P_2, Q_1, Q_2$

U	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,775
$P_1$	1	0,973	0,946	0,925	0,902	0,894
$P_2$	1,3	1,257	1,214	1,180	1,143	1,131
$Q_2$	0,615	0,635	0,655	0,660	0,653	0,645
$Q_1$	0,485	0,400	0,330	0,286	0,299	0,345
$E_1$	1,54	1,465	1,400	1,355	1,360	1,390

Зависимость  $E_1 = f_1(U)$  графически представлена на рисунке 3.

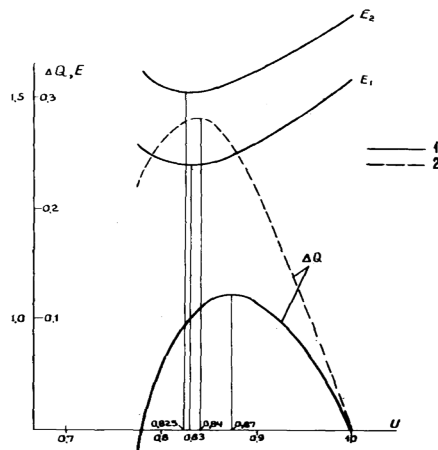


Рисунок 3 – Зависимость  $\Delta Q(U)$  и  $E(U)$ : — — при допущении  $P_1 = \text{Const}, P_2 = \text{Const}$ ; - - - с учетом  $P_1(U), P_2(U)$

По этой зависимости определяем  $U_{кр} = 0,83$ ;  $\kappa_U = 17$  %. Таким образом, полученное значение  $\kappa_U$  значительно превышает нормативное (10 %).

2. Аналогично может быть определено значение  $U_{кр}$  с помощью критерия  $\frac{dE_2}{dU} > 0$ . Проведенные рас-

четы показали следующие результаты:  $U_{кр} = 0,825$ ;  $\kappa_U = 17,5$  %.

3. Определим  $U_{кр}$  с помощью критерия  $\frac{d\Delta Q}{dU} > 0$ . С этой целью для ряда значений  $U$  рассчитываем зависимость

$$\Delta Q = Q_1 + Q_2 - Q_n = \varphi(U), \quad (5)$$

где

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{E_1 U}{x_1}\right)^2 - P_1^2} - \frac{U^2}{x_1}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов  $Q_1, \Delta Q$

U	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,775
$Q_1$	0,485	0,510	0,540	0,543	0,550	0,543
$Q_2$	0,615	0,635	0,655	0,660	0,653	0,645
$\Delta Q$	0	0,110	0,210	0,267	0,261	0,218

По зависимости  $\Delta Q = \varphi(U)$  определяем (рисунок 3):  $U_{кр} = 0,84$ ;  $\kappa_U = 16$  %.

Как следует из результатов расчетов, различие в значениях  $U_{кр}$ , полученных по критериям

$\frac{d\Delta Q}{dU} < 0, \frac{dE_1}{dU} > 0$  и  $\frac{dE_2}{dU} > 0$ , составляет около 1 %.

Результаты расчетов  $U_{кр}$  с помощью критерия  $\frac{d\Delta Q}{dU} < 0$  при условии  $P_1 = P_{10} = \text{const}$  и  $P_2 = P_{20} = \text{const}$  (см. рисунок 3) показывают, что такое упрощение приводит к увеличению  $U_{кр}$  на 3 % ( $U_{кр} = 0,87$ ).

Таким образом, доказано, что запас устойчивости по мощности и напряжению в узловой точке соблюдается. При этом значения  $U_{кр}$  составляют около 1 %. Метод эквивалентных преобразований соответствует реальному управлению в электрической системе, и позволяет проводить вычисления в комплексных числах, что позволяет рекомендовать его для использования в расчетах установившихся режимов энергосистем.

### Литература

1. Дикамбаев Ш. Оценка влияния экспорта электроэнергии на величину абсолютных и относительных потерь электроэнергии в электрических сетях ОАО НЭС Кыргызстана / Ш. Дикамбаев, Ю. Симаков // КНТЦ. Бишкек, 2009. С. 3–6.
2. Абраменкова Н.А. Структурный анализ электроэнергетических систем / Н.А. Абраменкова, Н.И. Воропай, Т.Б. Заславская. Новосибирск: Сиб. отд. РАН, 1990. 224 с.
3. Готман В.И. Эквивалентирование энергосистем для оценки статической устойчивости / В.И. Готман, А.В. Глазачев // Изв. Томск. политех. у-та. 2010. Т. 316. № 4. С. 152–155.