

6
A-2

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

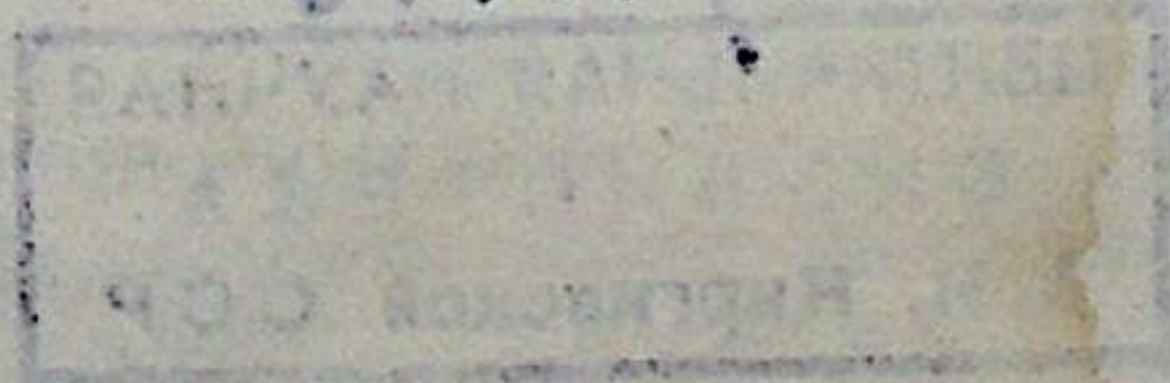
На правах рукописи.

инж. М. М. ЛЕБЕДЕВ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОГОРНЫХ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ НА СОБЛЮЖЕНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

1953



МОСКВА — 1953 г.

Электрификация Советского Союза охватывает все его районы, в том числе и высокогорные, отличающиеся рядом особенностей. Опыт проектирования, сооружения и эксплуатации первых советских высокогорных электроэнергетических систем позволяет выявить и обобщить указанные особенности и разработать методику разрешения электроэнергетических вопросов, возникающих в процессе планирования и проектирования высокогорных энергетических систем.

В частности, настоящая диссертация ставит своей целью дать рекомендации и расчетные формулы для выбора конфигурации сетей, расчетной мощности, напряжения, сечения и трассы линий передач, входящих в высокогорные энергетические системы.

На основании многолетних исследований представляется возможным охарактеризовать высокогорность следующими четырьмя признаками геолого-геоморфологического порядка:

а) высотность, т. е. расположение электрических установок на больших высотах над уровнем моря;

б) характерная о р о г р а ф и я, т. е. наличие горного макро-рельефа, определяющего физико-географическое лицо района.

в) характерная т о п о г р а ф и я местности, т. е. наличие сильно пересеченного микрорельефа;

г) характерная геология, т. е. наличие определенного комплекса горных пород.

Высокогорность представляет собой не собрание отдельных случайных явлений, а закономерную совокупность теснейшим образом переплетенных географических факторов.

Высокогорные районы богаты полезными ископаемыми, однако относительно бедны топливными ресурсами. Имеются благоприятные условия для сооружения экономичных гидростанций, стоимость которых в 2—3 раза ниже, чем равномошных равнинных гидростанций. Основной формой использования реки является каскад деривационных нерегулируемых гидростанций.

Высокогорные энергетические системы характеризуются высоким гидроэлектрическим коэффициентом, приближающимся к 1, и поэтому их можно рассматривать как системы гидроэнергетические. Трудность устройства регулирующих водохранилищ в высокогорных условиях приводит к созданию мощных гидроэлектрических районных регуляторов,

обслуживающих несколько каскадов, и к объединению каскадов линиями энергообмена.

Концентрация потребителей в немногочисленных удобных точках и ограничение мощности агрегата и ступени каскада условиями водотока приводят к тому, что потребительский агрегат может оказаться мощнее агрегата гидростанции, а потребительская подстанция — мощнее электростанции.

Особый характер приобретает проблема резервов. Системный резерв может быть обеспечен только суточной регулирующей емкостью, имеющейся не на всех станциях. Поэтому электрическая сеть должна быть дополнительно проверена на аварийные режимы, а резервные емкости должны быть размещены с учетом пропускной способности сети.

В высокогорных гидроэнергетических системах потоки энергии по линиям определяются в основном водным режимом водотока, а гидроресурсы распределены достаточно равномерно. Поэтому на приемном конце системы электропередачи, как правило, создается избыток реактивной мощности, который может быть использован для регулирования напряжения.

В подавляющем большинстве случаев, при правильном проектировании системы, трассы высокогорных линий будут проходить на высотах, не превосходящих 3000 м над уровнем моря. В этих пределах необходим учет высотности в типовых решениях.

Высотность отрицательно влияет на изоляционные конструкции и на охлаждение электрических машин. С высотой снижается критическое напряжение короны. Отрицательное влияние высотности несколько смягчается снижением температуры воздуха с высотой. В диссертации приведены некоторые количественные характеристики изменения расчетных условий с высотой.

В высокогорных районах существенно изменяются условия гроз, гололеда, ветра, электрических и механических характеристик грунтов. Одной из важнейших особенностей является крайняя неоднородность высокогорных районов в отношении всех факторов. В некоторых узко локализованных местах гололед, ветер и другие явления достигают катастрофических размеров. В то же время в общем высокогорные условия не очень сильно утяжеляют электрические установки, а в некоторых отношениях (грозы, фундаменты под опоры и т. д.) даже облегчают.

В отличие от равнинных систем, где конфигурация сети определяется только размещением генерирующих и потребляющих мощностей, в высокогорных электросистемах конфигурация сети в сильной степени зависит от орографии района и его существующей и возможной дорожной сети.

Линии электропередачи высокогорных электросистем делятся в основном на две резко отличных группы:

а) долинны е линии, связывающие между собой отдельные ГЭС и подстанции в пределах одного каскада, отличающиеся

малой длиной и как бы образующие сборные шины каскада, и б) перевальны е линии, связывающие между собой отдельные каскады и отличающиеся большой длиной, наибольшими отметками трасс и наиболее тяжелыми условиями строительства и эксплуатации.

Кроме того, в состав сети входят, как и в равнинных системах, распределительные линии.

Перевальные линии должны резервироваться не только по цепям, но и по трассам, так как наблюдались стихийные аварии, поражающие на данном перевале все цепи и требующие много времени для ликвидации.

Связь между каскадами является, как правило, периферийной и иногда требует создания специальных переключательных пунктов.

Конфигурация сети влияет на схемы коммутации станций и подстанций. Ввиду фиксированной мощности гидростанций, ограниченного числа и направления возможных линий, на большинстве установок нет необходимости добиваться какой-либо универсальности или возможности расширения, и можно применить наиболее простые и экономичные схемы с повышенным использованием аппаратуры. Это облегчает также компоновку подстанций.

Орографическая определенность конфигурации сети и ясность в размещении генерирующих мощностей на самых ранних стадиях проектирования делают возможным составление кадастра трасс линий параллельно с кадастром гидростанций. Опыт сооружения высокогорных систем показывает необходимость составления такого кадастра для заблаговременного накопления данных с микроклимате.

Энергетические системы описанного типа характеризуются отсутствием топливной слагающей в стоимости энергии. Поэтому при определении технико-экономических параметров сети стоимость потерь энергии должна учитываться по издержкам производства заменяющей гидростанции. Анализ различных режимов работы линии передачи приводит к тому, что в расчет должны быть подставлены следующие значения стоимости единицы мощности заменяющей гидростанции (A_c):

а) при передаче обеспеченной мощности

$$A_{c1} = A_{oc}$$

где A_{oc} — стоимость единицы основной мощности ГЭС;

б) при передаче постоянной мощности по линии, на генераторном конце которой находятся сезонная и регулирующая ГЭС,

$$A_{c2} = A_{dc} + A_{pc}$$

где A_{dc} — дополнительная стоимость единицы сезонной мощности; A_{pc} — дополнительная стоимость единицы регулирующей мощности;

в) при передаче по линии мощности сезонной ГЭС и нахождении регулирующей ГЭС на приемном конце системы передачи

$$A_{c3} = A_{dc} + A_{pc} \frac{(P_A - P_p)^2}{P_A^2},$$

где P_A — мощность, передаваемая по линии;
 P_p — мощность, покрываемая вне паводка регулирующей ГЭС;

г) при передаче по линии мощности сезонной ГЭС и нахождении потребителя — регулятора на приемном конце

$$A_{c5} = A_{dc} \left[1 - \frac{(P_A - P_p)^2}{P_A^2} \right] + A_{oc} \frac{(P_A - P_p)^2}{P_A^2};$$

д) при передаче регулирующей мощности

$$A_{c6} = A_{pc} \left[1 - \frac{(P_A - P_p)^2}{P_A^2} \right] + A_{oc} \frac{(P_A - P_p)^2}{P_A^2};$$

е) при обмене энергией

$$A_{c7} = A_{dc2} \frac{P_{c2}^2 + 2P_{c2}P_{o2}}{P_A^2} + A_{dcn} \frac{P_{cn}^2}{P_A^2},$$

где индекс „2“ обозначает генераторный конец системы передачи по отношению к постоянному потоку, на который наложен знакопеременный поток обмена энергией, а индекс „n“ — приемный конец системы. Соответственно

P_c — дополнительная сезонная мощность;
 P_o — обеспеченная мощность (мощность постоянного потока по линии).

При выборе сечения линии нужно иметь в виду U -образный характер кривой стоимости линии $K_A = f(q)$ в высокогорных условиях. Сечения, при которых имеет место минимум U -образной кривой, достаточно высоки, что хорошо увязывается со снижением критического напряжения короны. Для восходящей ветви U -образной кривой, принимая, что она прямолинейна, экономическая плотность тока

$$j = \sqrt{\frac{n}{3\rho A_c}},$$

где n — угол наклона восходящей ветви кривой $K_A(q)$ к оси абсцисс, экономически представляющий собой стоимость (для всех трех фаз) одного квадратного миллиметра дополнительного сечения единицы длины линии,
 ρ — удельное сопротивление материала провода.

Если принять экономическое сечение, необходимое для передачи обеспеченной мощности, за 1, то для передачи зарегулированной мощности требуется сечение больше 1, а для передачи сезонной мощности — ниже 1. Таким образом, сезонная энергия транспортабельнее регулирующей. Этот вывод оказывается в хорошем соответствии с качественными выводами, получаемыми из общих законов рентабельности социалистического производства.

Полученные значения A_c применимы и в других технико-экономических расчетах как в выборе напряжений, сравнение вариантов трассы, определение целесообразности искусственного регулирования и др.

Особого внимания требует определение параметров перевальных линий ввиду их ответственности и высокой стоимости.

Первый из электроэнергетических вопросов, связанных с перевальными линиями — определение их расчетной мощности. Здесь анализ показывает, что даже при использовании перевальной линии для покрытия суточного графика расчетная мощность ее может быть ограничена среднесуточной нагрузкой. Это достигается сочетанием энергообмена с разработанным советскими учеными неравномерным выпуском по каскаду воды из головного водохранилища.

Второй существенный вопрос — выбор точки присоединения перевальной линии к сети каскада. Исходя из закономерностей, характерных для высокогорных энергосистем, найден экономический параметр, пропорциональный стоимости сети вдоль каскада и одновременно потерям энергии в этой сети. Величина этого параметра для участка $a\beta$ может быть представлена как

$$u_{a\beta} = K_5 \left[\left(\int_0^a dP - v_{oa}P_n + w_{oa}P_n \right) (\beta - a) + \int_a^\beta dP dl - \int_a^\beta dP_n dl + \sum_a^\beta w_\gamma P_n (\beta - \gamma) - \sum_a^\beta v_\gamma P_n (\beta - \gamma) \right],$$

где K_5 — постоянная,
 P — мощность гидростанций каскада,
 v — доля нагрузки на данном участке,
 w — доля обмена с внешней сетью на данном участке,
 P_n — потребление мощности в районе каскада,
 a, β — точки встречи электропотоков,
 γ — расстояние сосредоточенной нагрузки от истока.
 Оптимум местонахождения точки подключения перевальной линии может быть выражен как

$$\sum_{a=0}^{\beta=L} |u_{a\beta}(\lambda)|_{\max} = \min,$$

где λ — расстояние точки подключения перевальной линии от истока,

$\zeta_{\text{макс}}$ — знак периода, когда $|u_{\alpha\beta}|$ на данном участке достигает максимума,

L — длина реки.

Рассмотрение численных примеров, а также геометризированной модели обобщенного каскада показывает, что в зависимости от распределения мощности и нагрузки вдоль каскада, наиболее выгодная точка присоединения перевальной линии может перемещаться вдоль каскада в довольно широких пределах. Как правило, она не совпадает ни с сосредоточенной нагрузкой каскада, ни с наибольшей станцией. Поэтому можно рекомендовать проектным организациям ориентироваться на сооружение самостоятельных обменных подстанций.

Третий вопрос, связанный с перевальными линиями — это выбор их напряжения как номинального, так и поддерживаемого в эксплуатации.

Ввиду того, что в высокогорных условиях относительное удорожание линий больше, чем относительное удорожание подстанций, в пределах, определяемых отсутствием потерь на корону, выгодно применять для передачи более высокое напряжение, чем для равнинных линий.

С момента же появления короны высокогорная линия становится нелинейным элементом системы, т. к. плотность воздуха изменяется по высоте, а, следовательно, и по длине линии. Применение обычных расчетных формул становится невозможным, и режим линии определяется системой уравнений

$$dU = Izdl$$

$$dI = Uy(U, l) dl,$$

где U — напряжение,

I — ток,

z — полное сопротивление единицы длины линии,

y — полная проводимость

Используя выражение проводимости короны, полученное Н. Б. Богдановой и В. И. Попковым, и решая приближенно приведенную систему дифференциальных уравнений, можно получить:

$$U_n = U_k \operatorname{ch} \lambda' + I_k \zeta' \operatorname{sh} \lambda' + U_k^2 \zeta' \int_0^L s(l) \operatorname{ch}^2 \frac{l}{L} \lambda' \cdot \operatorname{sh} \frac{L-l}{L} \lambda' dl + \\ + 2U_k I_k \zeta'^2 \int_0^L s(l) \operatorname{ch} \frac{l}{L} \lambda' \cdot \operatorname{sh} \frac{l}{L} \lambda' \cdot \operatorname{sh} \frac{L-l}{L} \lambda' dl$$

$$I_n = U_k \frac{1}{\zeta'} \operatorname{sh} \lambda' + I_k \operatorname{ch} \lambda' + U_k^2 \int_0^L s(l) \operatorname{ch}^2 \frac{l}{L} \lambda' \cdot \operatorname{ch} \frac{L-l}{L} \lambda' dl + \\ + 2U_k I_k \zeta' \int_0^L s(l) \operatorname{ch} \frac{l}{L} \lambda' \cdot \operatorname{sh} \frac{l}{L} \lambda' \cdot \operatorname{ch} \frac{L-l}{L} \lambda' dl,$$

где:

$$s(l) = \frac{2 \cdot 2,3 \cdot \sqrt{2} C^3 \cdot 10^{10}}{28 \cdot 2\pi \epsilon \cdot d_0 m} \times \\ \times \frac{e^{j\theta_l}}{[(0,94 \div 1,025) - (0,08 \div 0,095) H_l]^{\left(\frac{2}{3} \div 1\right)}} \text{ сим/кв.км};$$

$$\lambda' = L \sqrt{(r + jx)(g' + jb)};$$

$$\zeta' = \sqrt{\frac{r + jx}{g' + jb}} \text{ ом};$$

C — емкость линии фарад;

$$g' = -2,3C^2 \cdot 10^{10} \text{ сим/км};$$

d_0 — диаметр провода см;

m — коэффициент погоды;

θ_l — угол расхождения векторов \bar{U}_l и \bar{U}_k ;

H_l — высота трассы над уровнем моря км;

l — расстояние от конца линии до данной точки линии.

Однако, пользование приведенным решением затруднительно ввиду сложности функций $\theta_l(l)$ и $H_l(l)$. Кроме того, замена профиля линии аналитической функцией $H_l(l)$ связана с большими погрешностями. Поэтому для практических целей удобнее заменить аналитические функции $\theta_l(l)$ и $H_l(l)$ ступенчатым графиком и пользоваться более простыми выражениями:

$$U_n = U_k \operatorname{ch} \lambda' + I_k \zeta' \operatorname{sh} \lambda' + \frac{L}{v} U_k^2 \zeta' \left(\frac{s_0}{2} \operatorname{sh} \lambda' + \sum_1^{v-1} s_i \operatorname{ch}^2 \lambda'_i \operatorname{sh} \lambda'_{v-i} \right) + \\ + 2 \frac{L}{v} U_k I_k \zeta'^2 \sum_1^{v-1} s_i \operatorname{sh} \lambda'_{v-i} \operatorname{sh} \lambda'_i \operatorname{ch} \lambda'_i \\ I_n = U_k \frac{1}{\zeta'} \operatorname{sh} \lambda' + I_k \operatorname{ch} \lambda' + \frac{L}{v} U_k^2 \left(\frac{s_0}{2} \operatorname{ch} \lambda' + \right. \\ \left. + \frac{s_v}{2} \operatorname{ch}^2 \lambda' + \sum_1^{v-1} s_i \operatorname{ch} \lambda'_{v-i} \operatorname{ch}^2 \lambda'_i \right) + \\ + 2 \frac{L}{v} U_k I_k \zeta' \left(\frac{s_v}{2} \operatorname{ch} \lambda' \operatorname{sh} \lambda' + \sum_1^{v-1} s_i \operatorname{ch} \lambda'_i \operatorname{ch} \lambda'_{v-i} \operatorname{sh} \lambda'_i \right),$$

где ν — число участков, на которые разделена линия;
 s_i — s в начале i -го участка;

$$\lambda'_i = \frac{i}{\nu} \lambda'; \quad \lambda'_{\nu-i} = \frac{\nu-i}{\nu} \lambda';$$

$i = 0, 1, 2, \dots, \nu - 1$, ν — индекс участка.

Как показывает анализ, для напряжений до 110 кВ включительно корона в высотных условиях не создает дополнительных осложнений. Для более высоких напряжений может потребоваться снижение нормально-поддерживаемого уровня напряжения с целью получить минимум полных потерь.

Этот уровень напряжения может быть найден при помощи приведенных уравнений графоаналитическим методом. Аналогичным путем может быть установлена предельная высота, выше которой целесообразно применять специальные или расщепленные провода для уменьшения потерь на корону и повышения эксплуатационного напряжения.

Изложенные положения, опирающиеся на аналитические работы и опыт существующих высокогорных электроэнергетических систем, могут быть применены для выбора схем электрических сетей высокогорных энергосистем и параметров входящих в них линий электропередачи.

