

М. М. Лебедев

Выбор напряжения для линии электропередач регулирующей системы

Как показывает анализ графика работы гидростанций на незарегулированных реках типа бассейна Кура—Аракс, мощность гидростанции по кварталам в среднем изменяется следующим образом:

$$\text{I квартал} - \frac{1}{3} N$$

$$\text{II квартал} - N$$

$$\text{III квартал} - \frac{2}{3} N$$

$$\text{IV квартал} - \frac{1}{3} N,$$

где N — установленная мощность гидростанции. По данной модели годового графика могут быть определены основные параметры интерконнекционной линии.

Предположим, что на расстоянии 1 км от сезонной ГЭС мощностью N находится регулирующая система гидростанций неограниченной мощности, подпитывающая рассматриваемый нами энергетический узел своей регулирующей энергией.

При принятой нами модели графика нулевой баланс энергии, переданной по линии за год, будет достигнут при нагрузке района сезонной гидростанции

$$P_{\text{н}} = \frac{7}{12} N$$

В этом случае в I и IV квартале линия будет передавать к сезонной ГЭС

$$\frac{7}{12} N - \frac{1}{3} N = \frac{1}{4} N,$$

во II квартале — от сезонной ГЭС

$$N - \frac{7}{12} N = \frac{5}{12} N$$

и в III квартале—от сезонной ГЭС

$$\frac{2}{3} N - \frac{7}{12} N = \frac{1}{12} N.$$

Как и следует из поставленного условия, баланс энергии

$$\Delta = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - \frac{5}{12} - \frac{1}{12} \right) T = 0,$$

где T —число часов использования максимума в году. Для простоты делаем допущение о равенстве числа часов использования по кварталам, что близко сходится с действительностью.

При $P_n = N$ энергия все время течет от регулирующей системы к сезонной ГЭС.

Остальные варианты соотношения мощностей приводят к промежуточным результатам; отметим лишь случай $P_n = \frac{2}{3} N$, характерный тем, что максимум передаваемой мощности в обе системы один и тот же.

Рассмотрим, каково натуральное напряжение системы передачи при этих трех режимах. Условие максимального КПД

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{Cu^2_{\phi}}{2},$$

распространенное на год, приводит к уравнению

$$\frac{L}{2} \int_0^1 i^2 dt = \frac{C}{2} \int_0^1 u^2_{\phi} dt$$

и, интегрируя,

$$\frac{LI^2}{2} \tau = \frac{CU^2_{\phi}}{2}, \dots \dots \dots (1)$$

где L — самоиндукция линии в Генри на фазу;

C — емкость линии в фарадах на фазу;

I — расчетный ток в КА (i —его значение в данный момент);

U_{ϕ} — фазное напряжение в KV (u_{ϕ} —его значение в данный момент);

t — время в годах;

τ — продолжительность потерь (относительная)

Дальнейшим преобразованием уравнения (1) приходим к выражению для натуральной мощности

$$W_{\text{нат}} = \frac{U^2}{\zeta \sqrt{\tau}}, \dots \dots \dots (2)$$

где $W_{\text{нат}}$ — натуральная мощность в MVA;

ζ — волновое сопротивление в омах, в среднем $\zeta = 400$ ом;

U — линейное напряжение в KV.

Пусть декадные и суточные колебания графика приводят к относительной продолжительности использования максимума системы T . Тогда продолжительность использования максимума линии по кварталам будет равна:

Для интерконнекции нулевой энергии

$$T' = \frac{\frac{1}{4} NT + \frac{5}{12} NT + \frac{1}{12} NT + \frac{1}{4} NT}{4 \cdot \frac{5}{12} N} = 0,6T;$$

Для интерконнекции равных мощностей

$$T'' = \frac{\frac{1}{3} NT + \frac{1}{3} NT + 0 + \frac{1}{3} NT}{4 \cdot \frac{1}{3} N} = 0,75T;$$

Для регулирующей магистрали

$$T''' = \frac{\frac{2}{3} NT + 0 + \frac{1}{3} NT + \frac{2}{3} NT}{4 \cdot \frac{2}{3} N} = 0,625T.$$

Принимая в рассматриваемых нами пределах, что τ изменяется пропорционально T , получим

$$\begin{aligned} \tau' &= 0,6 \tau \\ \tau'' &= 0,75 \tau \\ \tau''' &= 0,625 \tau, \end{aligned}$$

где τ' , τ'' , τ''' — продолжительность потерь соответствующих режимов, а τ — продолжительность потерь по системе. В общем случае для некоторого режима n ,

$$\tau_n = a\tau,$$

подставляя это значение в формулу (2), найдем

$$U_{\text{нат}} = 20 \sqrt{w} \sqrt[4]{a\tau} \dots \dots \dots (3)$$

Полученное значение натурального напряжения отличается от известной формулы Гудвина множителем $\sqrt[4]{a\tau}$. В условиях обычных магистралей этот множитель близок к 1 и простая формула Гудвина не дает заметной ошибки (напр. при 6000 часах использования в год, $\sqrt[4]{\tau} = 0,87$).

В наших условиях, где продолжительность потерь понижается коэффициентом „а“, необходимо учесть поправку.

Принимая использование максимума системы равным 6000 часов в год, коэффициент мощности системы равным 0,9, а величины W и a в соответствии со всем, сказанным выше ($W = \frac{P}{0,9}$), находим выражения для натурального напряжения регулирующей линии:

Для интерконнекции нулевой энергии

$$U'_{\text{нат}} = 20 \cdot \sqrt{\frac{7N}{12,0,9}} \cdot \sqrt[4]{0,6 \cdot 0,87} = 12,3 \sqrt{N} \dots \quad (4)$$

Для интерконнекции равных мощностей равным образом

$$U''_{\text{нат}} = 13,9 \sqrt{N} \dots \quad (5)$$

и для регулирующей магистрали

$$U'''_{\text{нат}} = 16,3 \sqrt{N} \dots \quad (6)$$

Для сравнения отметим, что передача мощности N в район, где нет сезонной ГЭС, потребует напряжения при тех же исходных данных

$$U_{\text{нат}} = 20 \cdot \sqrt{\frac{N}{0,9}} \cdot 0,87 = 18,3 \sqrt{N} \dots \quad (7)$$

Полученные для разных напряжений величины натуральной мощности на одну цепь сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Натуральные мощности регулирующей передачи при 6000 часах использования максимума системы в мегавольтамперах.

Вид передачи	Напряжение в киловольтах					
	20	35	60	110	154	220
1. Интерконнекция нулевой энергии	3	8	24	80	160	320
2. Интерконнекция равных мощностей	2	6	19	63	120	250
3. Регулирующая магистраль	1,5	5	14	45	90	180
Питающая магистраль	1,2	4	11	36	70	140

Из таблицы 1 наглядно видно, что линия передачи может обеспечить регулирование гидростанции, грубо говоря, в 2 раза большей по мощности, чем натуральная мощность самой линии при обычной работе.

Так обстоит дело с экономической стороной передачи.

Для обеспечения передачи полученных нами больших мощностей необходимо добиться также удовлетворительного регулирования напряжения и устойчивости параллельной работы.

Идеальным случаем работы линии является режим с постоянным равенством напряжения приемного и передающего конца. Достижение этого режима возможно лишь при наличии значительных мощностей компенсаторов. Однако, в рассматриваемой системе постоянно имеется избыток установленной мощности, равный $\frac{2}{3} N$. Докажем, что этого избытка достаточно для компенсации потери напряжения в линии.

Потеря напряжения в линии

$$u = \frac{Plr}{U} + \frac{Qlx}{U},$$

где: u — потеря напряжения в KV;

P — передаваемая активная мощность в MVA;

Q — реактивная „ „ „ „ „ „

r — активное сопротивление 1 километра линии в омах;

x — реактивное „ „ „ „ „ „

Потеря напряжения будет равна нулю при

$$Q = -\frac{r}{x} P$$

При коэффициенте мощности агрегатов и нагрузки, равном 0,9, избыток синхронной мощности ГЭС, который может быть при достаточном возбуждении обращен на генерирование реактивной мощности

$$Q_m = \sqrt{\frac{N^2}{0,9^2} - P_n^2} = N \sqrt{\frac{1}{0,81} - \frac{1}{0,9}} = 1,06N$$

потребная реактивная мощность

$$Q_n = P_n \operatorname{tg} \varphi = 0,5 P_n$$

и избыточная, компенсирующая мощность

$$Q = Q_m - Q_n = 1,06N - 0,5 P_n$$

С другой стороны, передаваемая активная мощность в наиболее тяжелый период

$$P = P_n - P_m = P_n - \frac{1}{3} N.$$

Потери напряжения не будет при

$$1,06N - 0,5 P_n \geq \left(P_n - \frac{1}{3} N \right) \frac{r}{x}; \dots \dots \dots (8)$$

$x=0,4$ для воздушных линий; r для линии высокого напряжения не выше 0,25 ом/км.

Преобразуя (8), получаем

$$P_n \leq 1,12 N, \dots \dots \dots (9)$$

в то время как по условию P не может быть больше N . Падение $\cos \varphi$ до 0,7 снижает коэффициент уравнения (9) всего до 0,97, т. е. практически всегда можно обеспечить передачу регулирующей мощности без потери напряжения за счет одной синхронной мощности гидрогенераторов.

Остается только проверка на устойчивость. Заменяя регулируемую систему шинами бесконечной мощности и принимая запас статической устойчивости равный 3, находим условия устойчивости передачи регулирующей мощности:

Для интерконнекции нулевой энергии

$$U' = 0,94 \sqrt{N\bar{I}} \dots \dots \dots (10)$$

Для интерконнекции равных мощностей

$$U'' = 0,76 \sqrt{N\bar{I}} \dots \dots \dots (11)$$

Для регулирующей магистрали

$$U''' = 1,83 \sqrt{N\bar{I}} \dots \dots \dots (12)$$

Ход расчета нами не приводится для краткости. Расчет сделан в предположении $\cos \varphi = 0,9$; при более низких коэффициентах мощности предел устойчивости несколько возрастает за счет повышенного возбуждения генераторов, и коэффициенты уравнений (10, 11, 12) снизятся.

Сопоставляя (4, 5, 6) с (10, 11, 12), находим предельные длины линии, обеспечивающие устойчивость системы при натуральном напряжении и отсутствии потери напряжения в линии:

Для интерконнекции нулевой энергии $l' = 172$ км;

„ „ равных мощностей $l'' = 335$ км;

Для регулирующей магистрали $l''' = 79$ км.

Ко всему сказанному необходимо добавить, что установка бустеров или регулирующих трансформаторов обеспечивает дальнейшее увеличение радиуса передачи, т. к. создает возможность некоторого повышения ЭДС против величин, вытекающих из условия (8). Установка же синхронных компенсаторов может оправдать себя лишь в случае, если $\cos \varphi$ потребителя значительно ниже $\cos \varphi$ генераторов, что в системе, состоящей из гидростанций и, следовательно, притягивающей электроемких потребителей, практически исключается.

Полученные нами данные позволяют, помимо прямого их использования, правильно оценить необходимое напряжение коммутации электросистемы, опирающейся на регулируемую гидросистему заданной мощности. Оптимальным случаем в реальных условиях будет размещение каскада в центре восьмерки, состоящей из двух высоковольтных колец, причем каждое кольцо регулирует группу сезонных ГЭС. Принимая, что каскад работает на 50% мощности по ровному графику и 50% отдает в качестве регулирующей, найдем мощность куста следующим образом: провал сезонных систем равен $\frac{2}{3}$ их установленной мощности (см. выше); следовательно половина мощности регулирующей системы равна $\frac{2}{3}$ мощности сезонных систем, а вся мощность куста равна

$$N_{\text{сум}} = \left(2 \frac{2}{3} + 1 \right) N_c = 2,33 N_c,$$

где N_c — суммарная мощность всех сезонных ГЭС. Мощность, ложащаяся на одну цепь, равна $0,25 N_c$, откуда

$$U = (12,3 \div 16,3) \sqrt{\frac{0,25 N_{\text{сум}}}{2,33}} = (4,1 \div 5,4) \sqrt{N_{\text{сум}}} \quad (13)$$

Таблица 2 дает округленные значения мощности куста, обеспечиваемые соответствующим напряжением коммутации. Зная предельные радиусы передачи, мы можем также грубо определить зависимость напряжения коммутации от потенциальной мощности района, данной в MW/км² и потенциальной выработки, данной в квтч/км² год.

Таблица 2

Выбор напряжения гидроэлектрической системы

Напряжение KV	20	35	60	110	154	220
Мощность куста MW	16	50	150	500	1000	2000
Потенц. мощность р-на MW/км ²	0,8.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	7,5.10 ⁻³	0,025	0,05	0,1
Потенц. выработка р-на квтч/км ² год	3000	10000	30000	100000	200000	400000

Мощности таблицы 2 являются предельными, т. к. подсчеты сделаны для оптимальных условий, для систем, размеры которых не превышают в длину 500 км, причем системы не содержат тепловых электростанций.

Водно-Энергетический Институт
АН Арм. ССР

Մ. Մ. Լեբեդև

Լ ԱՐՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿԱՐԳԱՎՈՐՈՂ ՍԻՍՏԵՄԻ ԷԼԵԿՏՐԱ-
ԶԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ի Մ

Հաղորդման գիծը կարգավորող և կարգավորվող հիդրոսիստեմների միջև ալիքի միջ թողուն սղուծյուն ունի, քան ստորական պայմաններում: Հեղինակը տալիս է այդ երևույթի քանակական վերլուծությունը:

M. M. Lebedev

Voltage selection for transmission lines in interconnected hydro power systems

A transmission line in interconnected hydro power systems can transmit more power than in common conditions. The author gives quantitative analysis of this phenomena.