

УДК 621.311

**Исследование эффективности регулирования напряжения линий сверхвысоких номинальных напряжений с учетом потерь мощности на корону при различных погодных условиях**

Бруцкий-Стемпковский Н.А., Острейко А.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ПРОКОПЕНКО В.Г.

Линии электропередач (ЛЭП) сверхвысоких номинальных напряжений (СВН), как правило, являются системообразующими в объединенных энергосистемах (ОЭС) и обеспечивают передачу больших мощностей на значительные расстояния. К ЛЭП СВН предъявляются повышенные требования по надежности, а также к рациональному регулированию режимов передачи мощности.

Потери мощности на корону в энергосистемах с большой протяженностью ЛЭП СВН 330-750 кВ могут достигать сотен мегаватт и могут быть вполне соизмеримы с нагрузочными потерями во всей энергосистеме. На величину потерь мощности на корону влияет ряд факторов: конструктивное выполнение ЛЭП, рабочее напряжение, состояние погодных условий, загрязненность воздушного пространства вдоль линии и т.д.

Одним из мероприятий по снижению потерь мощности на корону является регулирование рабочего напряжения линии. При снижении рабочего напряжения потери мощности на корону уменьшаются, поскольку уменьшается напряженность электрического поля на поверхности провода, которая и определяет величину потерь мощности на корону. В то же время, при снижении рабочего напряжения увеличиваются нагрузочные потери мощности, так как при той же передаваемой мощности возрастает ток линии. Поэтому возникает оптимизационная задача минимизации суммарных потерь мощности [1]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{нагр}} + \Delta P_{\text{кор}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  – суммарные потери мощности в линии;

$\Delta P_{\text{нагр}}$  – нагрузочные потери мощности;

$\Delta P_{\text{кор}}$  – потери мощности на корону в ЛЭП.

Нагрузочные потери мощности в ЛЭП, например, при заданной мощности и напряжению в начале могут быть определены по известной формуле:

$$\Delta P_{\text{нагр}} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot r, \quad (2)$$

где  $P_1, Q_1$  – соответственно активная и реактивная мощность в начале линии;

$U_1$  – напряжение в начале линии;

$r$  – активное сопротивление ЛЭП.

Анализ научно-технической литературы [2,3 и др.] и исследования, проведенные на кафедре «Электрические системы» БНТУ показали, что в достаточно широком диапазоне изменения рабочего напряжения линий с номинальными напряжениями 750 и 500 кВ зависимость удельных потерь мощности на корону  $\Delta P_{\text{кор}}^{\text{ул}}$  от напряжения можно описать уравнением прямой линии:

$$\Delta P_{\text{кор}}^{\text{ул}} = a + b \cdot (U - U_{\text{ном}}), \quad (3)$$

где  $a, b$  – коэффициенты, зависящие от конструкции ЛЭП (геометрических размеров, конструкции фазы, сечения проводов в фазе и т.д.);

$U, U_{\text{ном}}$  – соответственно рабочее и номинальное напряжение линии.

В таблицах 1 и 2 приведены значения коэффициентов для линий номинального напряжения 500 и 750 кВ:

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для расчета удельных потерь мощности на корону в линии номинального напряжения 750 кВ и проводом 4хАС–600/72

Состояние погоды	$a, \frac{\text{кВт}}{\text{км}}$	$b, \frac{\text{кВт}}{\text{кВ} \cdot \text{км}}$
Хорошая	6,10	0,055
Снег	18,40	0,162
Дождь	66,00	0,512
Изморозь	141,00	0,840

Таблица 2 – Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для расчета удельных потерь мощности на корону в линии номинального напряжения 500 кВ и проводом 3хАС–400/51

Состояние погоды	$a, \frac{\text{кВт}}{\text{км}}$	$b, \frac{\text{кВт}}{\text{кВ} \cdot \text{км}}$
Хорошая	2,25	0,020
Снег	7,75	0,090
Дождь	31,50	0,344
Изморозь	68,00	0,580

Тогда потери мощности на корону для линии определяются по формуле [3]:

$$\Delta P_{\text{кор}} = \frac{l}{2} [a + b \cdot (U_1 - U_{\text{ном}})] + \frac{l}{2} [a + b \cdot (U_2 - U_{\text{ном}})], \quad (4)$$

где  $l$  – длина линии;

$U_1, U_2$  – соответственно напряжения в начале и конце ЛЭП.

В качестве объекта исследования выберем простейшую электропередачу, состоящую из генераторов станции, повышающего трансформатора, ЛЭП СВН, статического источника реактивной мощности (СИРМ) в начале линии и нагрузки в конце линии.

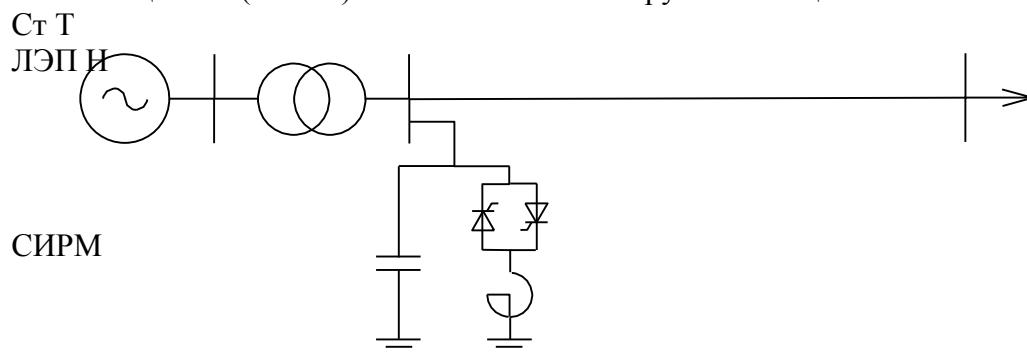


Рисунок 1 – Принципиальная схема исследуемой электропередачи

В качестве исходных данных примем, что линия работает в режиме близком к передаче натуральной мощности. Ориентировочное значение натуральной мощности для линии 750 кВ –  $P_{\text{нат}} = 2000$  МВт. Примем длину линии равной  $l = 250$  км, и марку провода 4хАС–600/72. Далее выберем генераторы станции: 4 генератора ТГВ-500-2УЗ, и трансформатор: 2 группы их трех однофазных трансформаторов ОРЦ-417000/750/20.

Оптимизационная задача поиска оптимального рабочего напряжения линии решается при соблюдении ряда условий:

- 1) Напряжение на шинах генератора не должно выходить за пределы  $(0,95 - 1,05)U_{\text{нГ}}$  ;

2) Реактивная мощность генерации имеет пределы регулирования от 0 (т.е. не вводя генератор в режим недовозбуждения) до номинальной, определяемой номинальным  $\cos \varphi$ ;

3) Напряжение в начале линии будем изменять в пределах  $(0,98 - 1,05)U_{ном}$ .

Для начала определим возможность регулирования напряжения в начале линии посредством генератора и СИРМ, а именно, изменяя напряжение на шинах и реактивную мощность генерации, при вышеназванных ограничениях, и изменяя реактивную мощность СИРМ. Моделирование осуществляется в программе расчета установившихся режимов RastrWin. Напряжение на шинах генераторов и в начале линии будем изменять согласованно:

Таблица 3 – Проверка регулирования напряжения в начале линии с помощью изменения параметров генератора и СИРМ

Напряжение на шинах генераторов $U_r, \text{кВ}$	Напряжение в начале линии $U_1, \text{кВ}$	Напряжение в конце линии $U_2, \text{кВ}$	Активная мощность генераторов $P_r, \text{МВт}$	Реактивная мощность генераторов $Q_r, \text{Мвар}$	Мощность СИРМ $Q_{СИРМ}, \text{Мвар}$
19,60	735,0	716,18	511,99	23,60	238,2
19,80	742,5	725,28	511,76	22,95	209,6
20,00	750,0	734,32	511,54	22,33	181,6
20,20	757,5	743,30	511,33	21,73	154,2
20,40	765,0	752,22	511,13	21,15	127,3
20,60	772,5	761,08	510,94	20,58	101,0
20,80	780,0	769,90	510,76	20,04	75,1
21,00	787,5	778,68	510,59	19,51	49,6

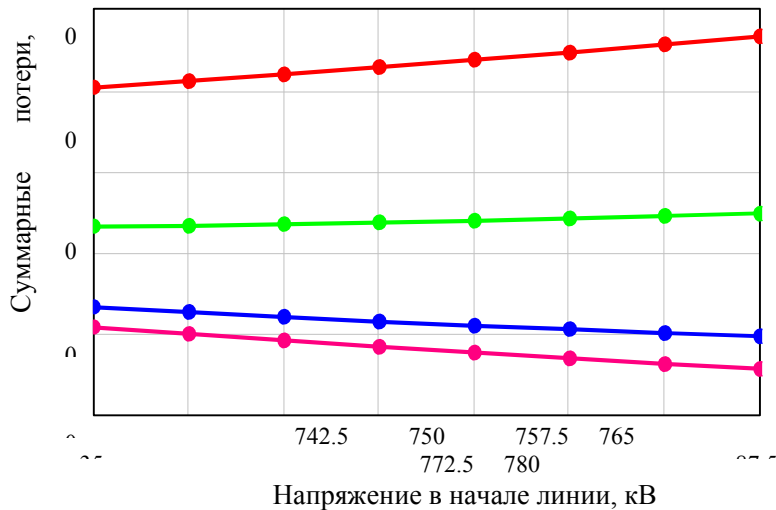
Из полученных результатов можно сделать вывод о физической возможности регулирования напряжения в начале линия в диапазоне  $(0,98 - 1,05)U_{ном}$ . Далее исследуем влияние различных погодных условий на режим линии при фиксированной нагрузке в конце линии  $S = 2000 \text{ МВт}$ , путем расчета серии установившихся режимов:

Таблица 4 – Данные расчетов при фиксированной мощности нагрузки

Напряжение в начале линии $U_1, \text{кВ}$	Погодные условия											
	Хорошие			Снег			Дождь			Изморозь		
	$\Delta P_{кор}, \text{МВт}$	$\Delta P_{нагр}, \text{МВт}$	$\Delta P_{\Sigma}, \text{МВт}$	$\Delta P_{кор}, \text{МВт}$	$\Delta P_{нагр}, \text{МВт}$	$\Delta P_{\Sigma}, \text{МВт}$	$\Delta P_{кор}, \text{МВт}$	$\Delta P_{нагр}, \text{МВт}$	$\Delta P_{\Sigma}, \text{МВт}$	$\Delta P_{кор}, \text{МВт}$	$\Delta P_{нагр}, \text{МВт}$	$\Delta P_{\Sigma}, \text{МВт}$
735,0	1,19	39,6	40,8	3,61	39,7	43,3	13,4	39,9	53,2	30,1	40,2	70,3
742,5	1,30	38,7	40,0	3,95	38,7	42,7	14,4	38,9	53,3	31,8	39,3	71,1
750,0	1,42	37,8	39,2	4,28	37,8	42,1	15,5	38,0	53,5	33,5	38,4	71,9
757,5	1,53	36,9	38,4	4,62	36,9	41,5	16,5	37,1	53,7	35,3	37,5	72,8
765,0	1,64	36,0	37,7	4,95	36,1	41,0	17,6	36,3	53,9	37,0	36,7	73,7
772,5	1,76	35,2	37,0	5,28	35,3	40,6	18,6	35,5	54,2	38,7	35,9	74,6
780,0	1,87	34,5	36,3	5,61	34,5	40,1	19,7	34,8	54,5	40,4	35,2	75,6
787,5	1,98	33,7	35,7	5,94	33,8	39,7	20,7	34,1	54,8	42,1	34,4	76,6

Рисунок 2 – Зависимости суммарных потерь мощности от напряжения для различных погодных условий

- 1 – Хорошая погода;
- 2 – Снег;
- 3 – Дождь;
- 4 – Изморозь.



Как видно из графиков и таблиц, при хорошей погоде и снеге потери на корону еще недостаточно велики, чтобы сильно повлиять на закономерности изменения потерь. При дожде потери на корону уже начинают оказывать сильное влияние, из-за чего зависимость суммарных потерь от напряжения оказывается практически параллельной оси ординат. При изморози потери на корону и вовсе начинают превосходить нагрузочные, и тем самым обуславливают увеличение суммарных потерь при увеличении напряжения.

На следующем этапе исследования будем рассматривать передаваемую мощность в качестве переменной величины. Для этого в качестве базовой определим натуральную мощность  $P_{нат} = 2000$  МВт, тогда мощность в относительных единицах:

$$P_* = \frac{P}{P_{нат}} \tag{5}$$

В условиях реальной эксплуатации линии 750 кВ используются для передачи мощности в диапазоне  $(0,4-1,2)P_*$ . В этом диапазоне будем искать минимум функции суммарных потерь от напряжения (1). Значение напряжения в начале линии  $U_1$ , соответствующее минимуму функции суммарных потерь назовем оптимальным напряжением  $U_{опт}$  для передачи мощности. Как ранее было рассчитано, с помощью генераторов и СИРМ возможно добиться напряжения в начале линии в диапазоне  $(0,98-1,05)U_{ном}$ . Поэтому при расчетах будем пользоваться упрощенной моделью сети: шины бесконечной мощности (ШБМ) с присоединенной к ним линией и нагрузкой в конце линии.

Расчеты будем производить в программе RastrWin. Для поиска экстремума в программе RastrWin необходимо задать величину, по которой будет производиться поиск экстремума, начальное приближение и приращение изменяемого параметра, в нашем случае напряжение на ШБМ. В качестве примера приведем расчет  $U_{опт}$  для  $P_* = 1,1$  при дожде:

Таблица 5 – Последовательность поиска экстремума в программе RastrWin

Название	V_1	_1 2 0
Инициализация	750,000	61,81099
Шаг [1]-[ 1.0000]	752,500	61,80107
Шаг [2]-[ 2.0000]	755,000	61,79397
Шаг [3]-[ 3.0000]	757,500	61,78733
Шаг [4]-[ 4.0000]	760,000	61,78257
Шаг [5]-[ 5.0000]	762,500	61,78268
Шаг [7]-[ 4.5000]	761,25	61,78225
Шаг [8]-[ 3.5000]	758,750	61,78412
Шаг [9]-[ 4.7500]	761,875	61,78179
Шаг [10]-[ 4.2500]	760,625	61,78241

Расчет повторяется да тех пор, пока напряжение в конце линии, полученное на соседних итерациях не будет отличаться на достаточно малую величину.

Учитывая тот факт, что формула удельных потерь (3) дает удовлетворительный результат при напряжениях в диапазоне  $(0,95-1,05)U_{ном} = 712,5-787,5$  кВ, а также то, что в условиях реальной эксплуатации рабочие напряжения ограничены сверху по условиям надежной работы изоляции, а снизу по условиям устойчивости параллельной работы генераторов, значения  $U_{опт}$  выходящие за пределы  $(0,98-1,05)U_{ном}$  будем учитывать только для более точного построения графиков, но не рассматривать в качестве оптимальных для передачи мощности.

В таблицах 6-9 приведем результаты только для тех значений  $U_{опт}$ , что попали в рабочий диапазон напряжений:

Таблица 6 – Данные результатов  $U_{опт}$  при хорошей погоде

$P$ , МВт	800	820	840	860	880	900	...
$U_{опт}$ , кВ	732,36	743,97	755,47	766,86	778,15	789,365	...

Таблица 7 – Данные результатов  $U_{опт}$  при снеге

$P$ , МВт	...	1280	1320	1360	1400	1440	...
$U_{опт}$ , кВ	...	732,13	746,78	761,28	775,64	789,82	...

Таблица 8 – Данные результатов  $U_{опт}$  при дожде

$P$ , МВт	...	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350	...
$U_{опт}$ , кВ	...	728,75	739,82	750,79	761,88	772,47	783,20	793,88	...

Таблица 9 – Данные результатов  $U_{\text{опт}}$  при изморози

$P$ , МВт	...	2100	2200	2300	2400
$U_{\text{опт}}$ , кВ	...	665,17	683,74	702,30	720,71

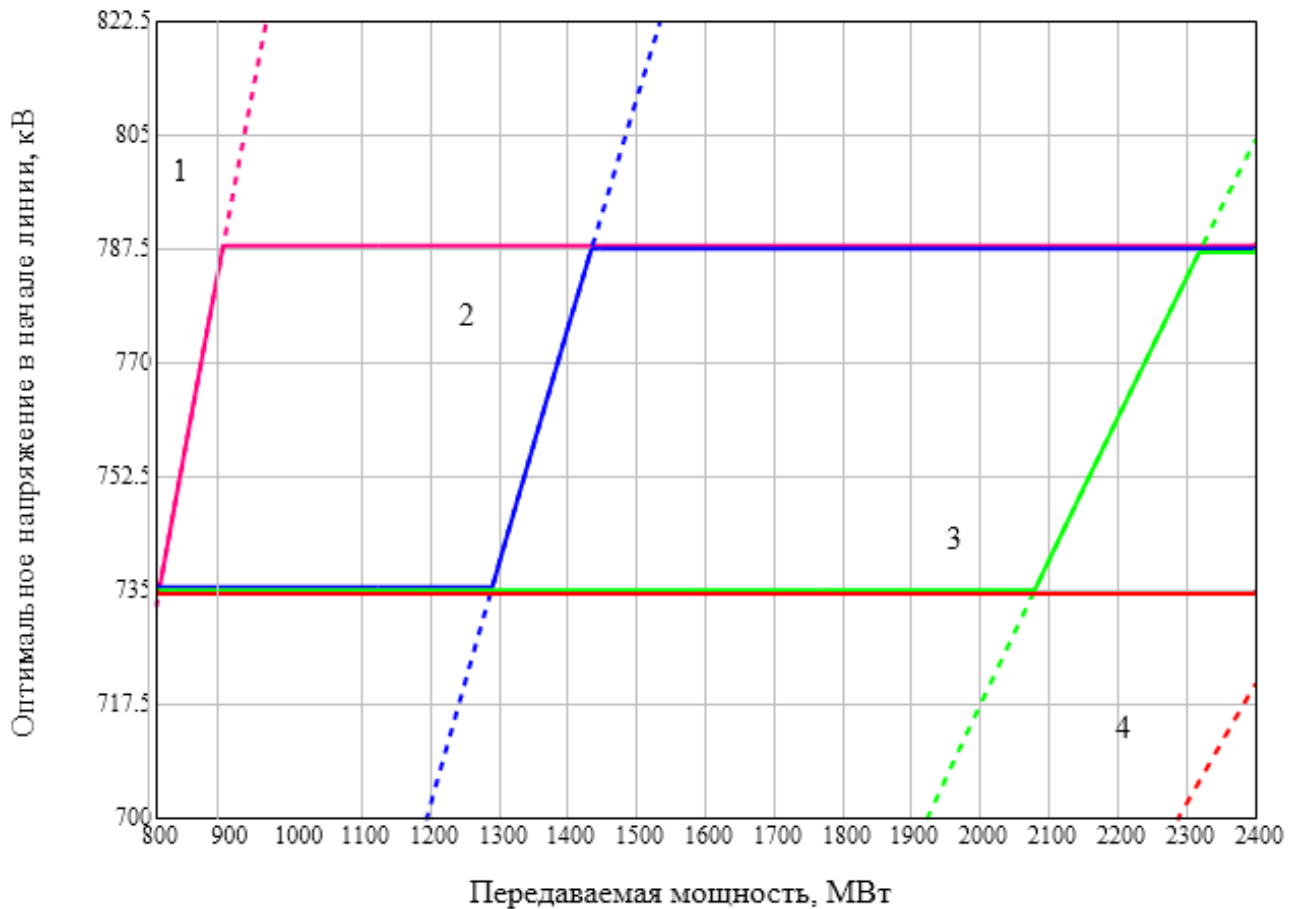


Рисунок 3 – Графики зависимости  $U_{\text{опт}}$  от передаваемой мощности:

1 – Хорошая погода; 2 – Снег; 3 – Дождь; 4 – Изморозь.

Пунктиром на графиках показаны значения, выходящие за диапазон  $(0,98-1,05)U_{\text{ном}}$ . Сплошными линиями показаны значения с учетом ограничений.

Как видно из графиков и таблиц, при хорошей погоде для диапазона мощностей 800-900 МВт существует  $U_{\text{опт}}$ , находящееся в диапазоне  $(0,98-1,05)U_{\text{ном}}$ . При увеличении мощности нагрузочные потери преобладают, поэтому  $U_{\text{опт}}$  соответствует наибольшему рабочему напряжению. При снеге диапазон мощностей, в котором существует оптимум напряжения в начале линии находится в области 1280-1440 МВт. При значениях мощностей ниже 1280 МВт  $U_{\text{опт}}$  принимается равным наименьшему рабочему напряжению, а при значениях выше 1440 МВт – наибольшему рабочему напряжению. При дожде диапазон мощностей, в котором существует оптимум напряжения в начале линии смещается в область 2075-2325 МВт. При значениях мощностей ниже 2075 МВт  $U_{\text{опт}}$  принимается равным наименьшему рабочему напряжению, а при значениях выше 2325 МВт – наибольшему рабочему напряжению. При изморози потери на корону достигают таких значений, что для всего диапазона мощностей 800-2400 МВт  $U_{\text{опт}}$  соответствует минимальному рабочему напряжению.

По полученным данным сделаем выводы:

Суммарные потери мощности и энергии в сетях сверхвысокого напряжения отнесенные ко всей передаваемой мощности являются небольшой величиной. Однако если рассматривать абсолютную величину потерь – то значения становятся довольно значительными. Так, например, при передаче мощности при неоптимальных напряжениях величина потерь мощности дополнительно увеличивается на 5-6 МВт при различных погодных условиях, что составляет до 14% от общей величины потерь. В эпоху перехода от индустриального общества к постиндустриальному, когда наука становится ведущим фактором производства, необоснованный перерасход углеводородов оправдать невозможно. Особенно в сложившейся экологической обстановке. Поэтому важность организационных мероприятий по снижению потерь, не требующих дополнительных капитальных затрат, сейчас особенно важна.

Логическим продолжением этого исследования может стать изучение режимов электропередач сверхвысокого напряжения при большем количестве вводных данных: динамика передаваемой мощности, протяженность линий, марка проводов на участках, потоки мощности на участках, различные погодные условия на всем протяжении линии или скоротечное их изменение.

### Литература

1. Поспелов Г.Е., Федин В.Т., Лычев П.В. Электрические системы и сети. – Мн.: УП «Технопринт», 2004.
2. Дальние электропередачи 750 кВ. Ч. I / Под общ. ред. А.Н. Некрасова и С.С. Рокотяна. – М.: Энергия, 1975.
3. Федин В.Т., Прокопенко В.Г. Планирование характерных режимов электрических сетей 110-750 кВ по напряжению и реактивной мощности. // Электрические станции. – 1977. – № 12.