

РАСЧЕТ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

А. И. ЗАЙЦЕВ и И. Д. КУТЯВИН

Перевод протяженных участков железных дорог на электрическую тягу, а также электрификация сельскохозяйственных районов страны потребуют применения особой упрощенной методики расчета сети высокого напряжения с равномерно распределенной нагрузкой. В самом деле, питание тяговых подстанций протяженных участков с однородным профилем будет иметь почти идеальные условия равномерно распределенной нагрузки.

Нагрузки некоторых подстанций (на горных и пригородных участках) будут отличными от нагрузки магистральных подстанций, но они не будут иметь решающего влияния [3] на режим работы линии.

Точки отбора мощности могут отстоять друг от друга на 15—30 км, в зависимости от способа обслуживания и типа выпрямительных устройств тяговых подстанций [2]. Меньшие расстояния будут применяться, вероятно, при полной автоматизации тяговых подстанций, оборудованных одним выпрямительным устройством с одноанодными выпрямителями.

Для расчета линий высокого напряжения с равномерно распределенной нагрузкой можно воспользоваться известными уравнениями передачи энергии с равномерно распределенными постоянными [1]:

$$u_{\phi 1} = u_{\phi 2} Ch \sqrt{z_0 y_0} l + I_2 \sqrt{\frac{z_0}{y_0}} Sh \sqrt{z_0 y_0} l; \quad (1)$$

$$I_1 = u_{\phi 2} \sqrt{\frac{y_0}{z_0}} Sh \sqrt{z_0 y_0} l + I_2 Ch \sqrt{z_0 y_0} l. \quad (2)$$

Или можно использовать также приближенные формулы, полученные из (1) и (2) путем разложения гиперболических функций в ряд:

$$u_{\phi 1} = u_{\phi 2} \left(1 + \frac{z_0 y_0}{2} l^2 \right) + I_2 z_0 l \left(1 + \frac{z_0 y_0}{6} l^2 \right); \quad (3)$$

$$I_1 = u_{\phi 2} y_0 l \left(1 + \frac{z_0 y_0}{6} l^2 \right) + I_2 \left(1 + \frac{z_0 y_0}{2} l^2 \right). \quad (4)$$

При применении этих уравнений для расчета линий с равномерно распределенной нагрузкой в проводимость их y_0 необходимо включить, кроме естественной проводимости линии, также и проводимость нагрузки, отнесенную к одному километру длины, которая может быть определена, исходя из удельной активной нагрузки:

$$g_n = \frac{P}{u_p^2} \cdot 10^{-3} \text{ сим/км}, \quad (5)$$

Реактивная проводимость нагрузки, отнесенная к одному километру длины линии:

$$b_n = \frac{Q}{u_p^2} \cdot 10^{-3} \text{ сим/км}, \quad (6)$$

где u_p — расчетное напряжение в кВ, за которое может быть принято напряжение в конце или среднее эксплуатационное напряжение линии,

P — активная нагрузка в кВт/км и

Q — реактивная нагрузка в квар/км.

Суммарное сопротивление фазы линии, отнесенное к километру длины:

$$z_0 = r_0 + jx_0 = z_0 e^{j\varphi_z}. \quad (7)$$

Суммарная проводимость фазы линии, отнесенная к километру длины:

$$y_0 = (g_l + g_n) + j(b_c - b_n) = y_0 e^{j\varphi_y}, \quad (8)$$

где r_0 и x_0 — сопротивления одного километра линии в омах,

g_l и b_c — проводимости одного километра линии в сим,

g_n и b_n — проводимости нагрузки на один километр линии.

При отсутствии транзита мощности по линии можно считать $I_2 = 0$.

Тогда расчетные формулы (1—4) упростятся и примут вид:

$$u_{\phi 1} = u_{\phi 2} Ch \sqrt{z_0 y_0} l; \quad (9)$$

$$I_1 = u_{\phi 2} \sqrt{\frac{y_0}{z_0}} Sh \sqrt{z_0 y_0} l; \quad (10)$$

$$u_{\phi 1} = u_{\phi 2} \left(1 + \frac{z_0 y_0}{2} l^2 \right); \quad (11)$$

$$I_1 = u_{\phi 2} y_0 l \left(1 + \frac{z_0 y_0}{6} l^2 \right). \quad (12)$$

Формулы (1—4) и (9—12) применительно к линиям с равномерно распределенной нагрузкой дают зависимости типа:

$$u_{\phi 1} = f(l) \text{ и } I_1 = \varphi(l).$$

Пользуясь этими формулами, мы можем определить напряжение и ток в любой точке линий передачи высокого напряжения с равномерно распределенной нагрузкой без каких-либо промежуточных расчетов.

Рассмотрим в качестве примера случай, когда нагрузки заданы сосредоточенными (рис. 1).

Как известно, сосредоточенная нагрузка вызовет такую же потерю напряжения в линии, если она будет приложена в центре равномерно распределенной нагрузки данного участка. Заменим сосредоточенные нагрузки равномерно распределенными (рис. 1).

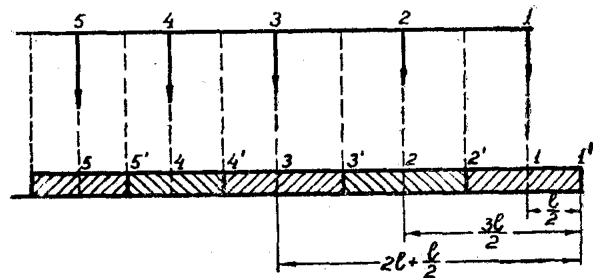


Рис. 1

При определении потерь напряжения к длине линии нужно прибавлять фиктивный пролет, равный $\frac{l}{2}$, так как при замене сосредоточенной наг-

рузки равномерно распределенной точка 1 сдвигается вправо на $\frac{l}{2}$ (точка 1'), что равносильно удлинению линии.

При определении величины тока прибавления фиктивного пролета не требуется, так как ток в точке 2', согласно предыдущим выводам, будет соответствовать току в начале участка 1—2.

В табл. 1 проводится сравнение методов расчета для радиальной линии длиной 300 км, провод АС—150, напряжение на конечной подстанции $u_{\phi 2} = 104,5$ кВ, мощность каждой подстанции $P_{nc} = 6000$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$, расстояние между подстанциями $l_{nc} = 30$ км. Сопротивления линии на 1 км $r_0 = 0,21$ ом/км; $x_0 = 0,42$ ом/км. Проводимости линии $g_l = 0$ и $b_c = 2,7 \cdot 10^{-6}$ сим/км.

Активная проводимость нагрузки на 1 км линии на основании (5):

$$g_n = \frac{P_{nc}}{l_{nc} \cdot u_p^2} \cdot 10^{-3} = \frac{6000}{30 \cdot 104,5^2} \cdot 10^{-3} = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ сим/км.}$$

Реактивная проводимость нагрузки на 1 км линии на основании (6):

$$b_n = \frac{Q_{nc}}{l_{nc} \cdot u_p^2} \cdot 10^{-3} = \frac{P_{nc} \operatorname{tg} \varphi}{l_{nc} \cdot u_p^2} \cdot 10^{-3} = \frac{6000 \cdot 0,328}{30 \cdot 104,5^2} \cdot 10^{-3} = 6,01 \cdot 10^{-6} \text{ сим/км.}$$

В графах 2, 3 и 4 табл. 1 приведены результаты расчета линии, указанной на рис. 1, по формулам (1) и (2) с учетом ступенчатости нагрузок. Данные графы 5, 6 и 7 получены по наиболее распространенным формулам, составленным на основании схем замещения. Наконец, данные граф 8, 9 и 10 получены по формулам (9) и (10) и граф 11, 12 и 13 — по формулам (11) и (12) с учетом равномерно распределенной нагрузки. Данные граф 2 и 3, как контрольные, вычислены с большой степенью точности.

Сравнивая между собою данные граф 2, 5, 8 и 11, можно сделать вывод, что последние три способа (графы 5, 8 и 11) дают результаты весьма близкие к первому. Мы наблюдаем лишь небольшие расхождения в напряжениях в третьем знаке, разница в величинах токов получилась более значительной. Так, например, упрощенный способ расчета, основанный на схеме замещения, дает ток, заниженный на 10% (графа 6), а расчет с учетом равномерно распределенной нагрузки (графы 9 и 12) дает завышенные токи на 9%. Последнее объясняется тем, что при вычислении проводимостей нагрузки было принято в расчет напряжение на конце линии 104,5 кВ вместо среднего эксплуатационного 110 кВ, поэтому эти проводимости оказались несколько преувеличенными.

Однако предлагаемый метод расчета линий высокого напряжения с равномерно распределенной нагрузкой обладает весьма большой простотой. Этот способ позволил вычислять данные любой строки табл. 1 без вычисления данных предыдущих строк, тогда как ступенчатый метод требует последовательного расчета линии на каждом пролете между нагрузками. Так, например, для получения данных последней строки табл. 1 при ступенчатом расчете (графы 2 и 3) потребовалось применить формулы (1) и (2) десять раз, а для получения данных последней строки при учете равномерно распределенной нагрузки потребовалось применить для граф 8 и 9 формулы (9) и (10) один раз и для граф 11 и 12 формулы (11) и (12) тоже один раз.

Расчет более сложных сетей будет сводиться, как обычно, к определению точки токораздела при одинаковых напряжениях в узлах питания, разрезанию сети в этой точке на элементарные участки и к расчету этих элементарных участков по уравнениям (1), (2), (9—12).

Таблица 1

Длина в км <i>l</i>	Ступенчатый расчет						Равномерно распределенная нагрузка					
	точный метод (по гиперболическим функциям)			по схемам замещения			по гиперболическим функциям			по формулам разложения гиперболических функций		
	<i>U</i>	<i>I</i>	φ	<i>U</i>	<i>I</i>	φ	<i>U</i>	<i>I</i>	φ	<i>U</i>	<i>I</i>	φ
30	60817	33.48	10.6	60720	33.7	10.6	60700	33.6	10.7	60720	33.6	10.5
60	61410	67.05	11.3	61330	67.1	11.1	61560	67.4	11.3	61500	68.0	11.2
90	62310	100.6	12.25	62210	100.0	11.6	62100	101.8	11.5	62250	101.0	11.65
120	63520	134.1	13.5	63470	132.5	12.4	63500	137.0	11.9	63500	136	12.9
150	65080	167.4	15.0	65090	164.0	13.55	65050	172.0	13.7	64900	172.3	14.0
180	67000	200.3	16.2	66936	194.1	14.25	64850	208	15.2	66600	209	15.5
210	69200	232	18.5	69420	221	15.3	69400	246.1	16.8	69500	244.5	15.5
240	71890	265.9	20.4	72225	248.2	16.4	72300	284.2	18.6	72200	284.0	17.9
270	75020	298.4	22.4	75500	273.2	17.45	75100	323.2	19.55	75300	325.0	19.0
300	78580	330.7	24.6	78840	298.0	18.4	78850	364	20.85	78600	360	19.9

После того, как известно, определяются уравнительные токи, обусловленные неодинаковостью действительных напряжений в узлах, эти токи налагаются на линию и определяются новые точки токораздела и т. д.

Рассмотрим для примера методику расчета линии с двусторонним питанием, приведенной на рис. 2.

Эта линия на участке AB имеет равномерно распределенную нагрузку, а на участке BC отбор мощности отсутствует. Требуется найти распределение напряжения и токов в этой линии, если напряжения в узлах A и C должны быть равны соответственно u_a и u_c .

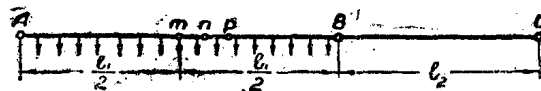


Рис. 2

Предположим сначала, что напряжения в точках A и B одинаковы и равны u_a , тогда точка токораздела будет в точке m , на середине участка AB .

Воспользовавшись уравнениями (1), (2), (9 — 12) и исходя из заданного напряжения, определим, при этих условиях, напряжения в точках m и C и токи, вытекающие из точек A , B и C . Если при этом напряжение в точке C окажется отличным от заданного напряжения u_c , определяется уравнительный ток, который должен вытекать из точки C для того, чтобы изменить напряжение в этой точке. После наложения уравнительного тока на линии AC находим новую точку токораздела n и снова определяем напряжения в точках n , B и C при заданном напряжении u_a , а также токи, вытекающие из A , B и C . Если и на этот раз напряжение в C будет отличаться от действительного, нужно еще раз определить дополнительный уравнительный ток, вытекающий из точки C и снова найти новую точку токораздела p и определить напряжения u_p , u_a и u_c и токи, вытекающие из A , B и C . Таким образом, используя метод последовательного приближения, можно рассчитать указанную линию с достаточной для практики степенью точности.

ВЫВОДЫ

1. Приведенный выше метод расчета линий высокого напряжения с равномерно распределенной нагрузкой не уступает по точности расчетам по схемам замещения.

2. Этот метод может значительно ускорить и упростить проектирование высоковольтных сетей с равномерно распределенной нагрузкой.

3. Этот метод применим во всех случаях, когда производится отбор мощности от линии примерно равными порциями и через равные промежутки. Минимальное число отборов, когда получается еще достаточная точность, равно 3 — 4.

4. Формулы (11 и 12), не требующие применения гиперболических функций и дающие достаточную точность, являются более удобными для расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Круг К. А. — Основы электротехники, т. II, стр. 503 — 513, 1946.
2. Розенфельд В. Е. — Электрическая тяга поездов, стр. 581 — 586.
3. Сердинов С. М. — Электричество № 9, стр. 3, 1947.