

УДК 621.315.1

СРАВНЕНИЕ ОДНОЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 220 КВ С КОАКСИАЛЬНЫМ ДВУХСЕГМЕНТНЫМ И ЧЕТЫРЕХСЕГМЕНТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ФАЗ

Зайцев П.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Старжинский А.Л.

Термин компактные линии введен в США и определяет такой тип линий, где приняты специальные меры для уменьшения междуфазовых расстояний вплоть до минимальных допустимых, определяемых нормированными воздействиями перенапряжений. Увеличение пропускной способности линий сверхвысокого напряжения пропорционально числу составляющих в фазе может быть достигнуто при любой конструкции линии. Однако увеличение числа составляющих требует значительного увеличения размера фаз. Уменьшение расстояния между фазами приводит к практически пропорциональному уменьшению размера фаз.

К компактным одноцепным линиям с нетрадиционным расположением проводов расщепленных фаз относят коаксиальные и сеточные линии. Использование расщепленных фаз токопровода расширяет возможности передачи электрической энергии воздушным путём. В такой линии провода одной из расщепленных фаз образуют контур внутренней окружности коаксиальной конструкции, а провода других фаз - контур внешней окружности.

Пропускная способность коаксиальной двухсегментной линии определяется числом проводов, содержащимся в каждой из расщепленных фаз, расстояниями между проводами одной фазы и проводами разноименных фаз, радиусом расщепления внутренней фазы, а также радиусом расщепления и длиной внешних фаз. Данную линию в отличие от известных всегда можно выполнить симметрично загруженной по фазам а, b, с без транспозиции по длине линии. Равенства электрических зарядов фаз линии достигаются следующими путями: варьированием числа проводов фазы а и фаз b и с; изменением расстояния между проводами одноименных фаз b и с; выбором диаметра внутренней и внешней концентрических окружностей, и длины внешних фаз.

В коаксиальной четырехсегментной линии провода каждой из двух расщепленных фаз, расположенные по контуру внешней окружности, разделены на две части (полуфазы). Провода каждой из полуфаз одной фазы размещены между проводами полуфаз другой фазы. Это обеспечивает усиление электромагнитного влияния в электропередаче, а тем самым улучшение её электрических характеристик.

Натуральная мощность линии зависит от напряжения и волнового сопротивления. Для повышения натуральной мощности эффективно повышать напряжение, но это не всегда возможно осуществить, поэтому уменьшают волновое сопротивление.

Для линии без потерь, как известно, волновое сопротивление определяется выражением:

$$Z_{\text{В}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (1)$$

где L_0, C_0 -удельные индуктивность и ёмкость линии. Параметры L_0, C_0 связаны со скоростью распространения электромагнитной волны v :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \text{ или } v^2 = \frac{1}{L_0 C_0}$$

При известном значении v произведение $L_0 C_0 = \text{const}$. Запишем

$$C_0 = \frac{1}{L_0 v^2}, L_0 = \frac{1}{C_0 v^2}$$

Тогда волновое сопротивление можно выразить только через индуктивность или только через ёмкость:

$$Z_{\text{В}} = L_0 v,$$

или

$$Z_{\text{В}} = \frac{1}{C_0 v}.$$

С учетом этого, натуральная мощность линии без потерь может быть представлена в виде:

$$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{L_0 v}, \quad (2)$$

или

$$P_{\text{нат}} = U_{\text{н}}^2 C_0 v \quad (3)$$

Отсюда следует, что для снижения волнового сопротивления линии надо уменьшить индуктивность (или, что равносильно, увеличить ёмкость).

Рассмотрим теперь, от каких параметров зависит индуктивность провода линии. Пусть в пространстве размещено n проводов, которые в общем случае могут относиться к одной расщепленной фазе, к разным фазам одной и той же цепи либо к фазам разных цепей линии. Индуктивность провода, находящегося в системе из n проводов составит:

$$L_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \frac{I_j}{I_i} = M_{ii} + \sum_{i=1}^n M_{ij} \frac{I_j}{I_i} e^{j\theta_{ij}} \quad (4)$$

Здесь I_j, I_i - токи в j -м и i -м проводах; M_{ii} - собственная индуктивность i -го провода; M_{ij} - взаимная индуктивность между i -м и j -м проводами; θ_{ij} -угол между векторами токов в j -м и i -м проводах.

При равенстве токов во всех проводах ($I_j = I_i$)

$$ReL_i = M_{ii} + \sum_{i=1}^n M_{ij} \cos \theta_{ij}$$

Собственную и взаимную индуктивность провода определяют по формулам:

$$M_{ii} = \left(2 \ln \frac{1}{r_i} + 0,5\mu\right) 10^{-4}, \quad (5)$$

$$M_{ij} = 2 \ln \frac{1}{D_{ij}} 10^{-4}, \quad (6)$$

где r_i - радиус провода; D_{ij} -расстояние между проводами; μ -магнитная проницаемость.

Проанализируя данные выражения, получим, что снижения индуктивности можно добиться увеличением радиуса провода. Этот путь широко используется на практике и реализуется в виде традиционного расщепления фаз, при котором увеличивается эквивалентный радиус. Если радиус провода (или эквивалентный радиус провода) сохранять неизменным, то задача минимизации индуктивности представляется в виде

$$\min ReL_i = \min(M_{ii} + 2 \cdot 10^{-4} \sum_{i=1}^n \ln \frac{1}{D_{ij}} \cos \theta_{ij}), \quad (7)$$

Отсюда следует, что при фиксированных углах $\theta_{ij} > 90^\circ$ индуктивность провода будет снижаться при уменьшении расстояния D_{ij} между проводами. Отмеченный эффект проявляется в обычных одноцепных трехфазных линиях при сближении проводов фаз, в которых токи сдвинуты друг относительно друга на угол 120° .

В общем случае из этой формулы видно, что максимального уменьшения индуктивности можно добиться, воздействуя одновременно на три параметра: расстояние между проводами D_{ij} , угол θ_{ij} и число проводов n . При этом в сложной система при формировании взаимного расположения проводов по отношению к данному проводу необходимо руководствоваться следующим:

1. Чем больше угол θ_{ij} между векторами i -го и j -го проводов при $\theta_{ij} > 90^\circ$, тем ближе следует стремиться расположить данные провода. Наибольший эффект достигается при максимальном сближении и углах $\theta_{ij} = 180^\circ$.

2. Чем меньше угол θ_{ij} при $\theta_{ij} < 90^\circ$, тем дальше необходимо располагать провода друг от друга.

3. Эффект тем сильнее, чем больше число других проводов с углами $\theta_{ij} > 90^\circ$ сблизить с рассматриваемым проводом. Максимальный эффект будет достигнут, если токи всех проводов, расположенных рядом с данным проводом, будут иметь угол $\theta_{ij} = 180^\circ$.

Рассмотрим четыре линии электропередач напряжением 220 кВ, с проводами АС240/32.

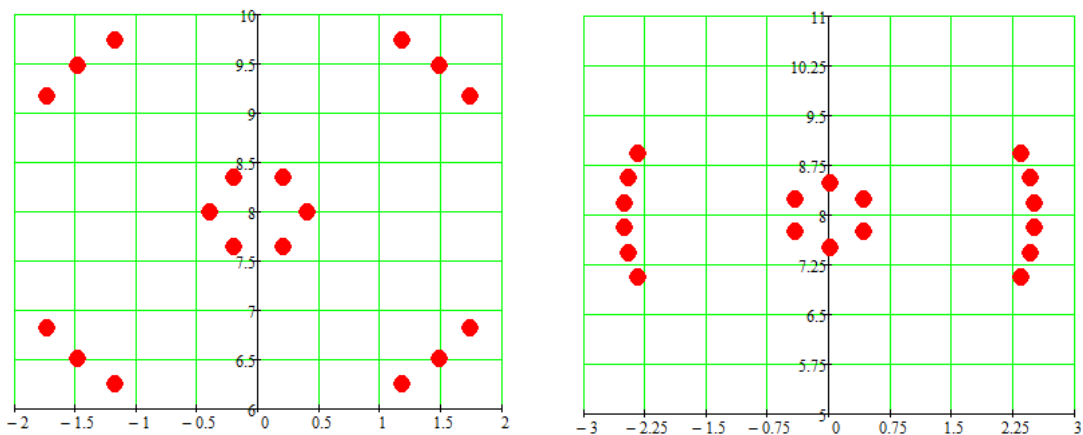


Рисунок 1. Одноцепная коаксиальная четырехсегментовая и двухсегментовая линии с расщеплением фаз на 6 проводов

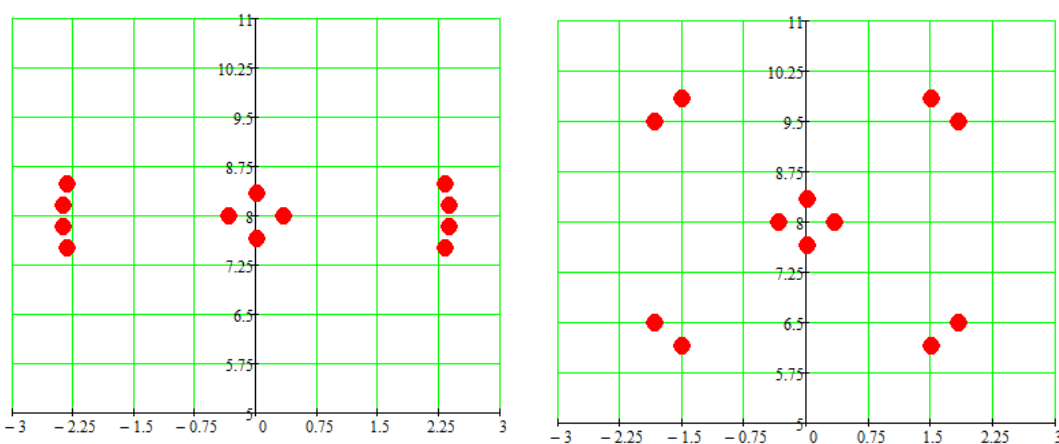


Рисунок 2. Одноцепная коаксиальная четырехсегментовая и двухсегментовая линии с расщеплением фаз на 4 провода

Проведем расчет данных линий электропередач и полученные значения запишем в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета компактных линий

№ линии	U _н , кВ	Марка провода	Количество проводов	Количество сегментов	R _н , МВт	Z _в , Ом	E _{макс} , кВ/м
1	220	АС 240/32	4	2	297.12	162.89	3.609
2	220	АС 240/32	4	4	427.8	113.12	4.086
3	220	АС 240/32	6	2	383.06	126.35	4.888
4	220	АС 240/32	6	4	558.89	86.6	4.614

Как видно по результатам расчета:

1) При увеличении числа проводов с 4 до 6 значение натуральной мощности увеличилось на 28 и 30%, волновое сопротивление уменьшилось на 22,4 и 23,4%, а напряженность электрического поля увеличилось на 35,4 и 12,9% соответственно для коаксиальной двухсегментовой и четырехсегментовой линии электропередачи;

2) При переходе от двухсегментовой к четырехсегментовой коаксиальной линии электропередач можно наблюдать значительное изменение натуральной мощности - на 43,9% и на 45,9% соответственно для линий с 4 и 6 проводами в фазе. Также уменьшилось значение волнового сопротивления на 30,6% и 31,5%, а значение напряженности увеличилось на 13% в линии с 4 проводами в фазе, и уменьшилось на 5,6% в линии с 6 расщепленными проводами в фазе.

Литература

1. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / Федин В.Т., Головач Ю.Д., Селиверстов Г.И., Чернецкий М.С. – Минск: Наука и техника, 1993.