

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИИ С ВЕНТИЛЬНЫМ РАЗРЯДНИКОМ

Розглянуто питання розрахунку перенапруг у вузлових точках підстанції з вентиляним розрядником методом хвиль, що біжать. Розроблено алгоритм чисельної моделі графічного рішення нелінійного диференціального рівняння, що дозволяє побудувати графіки зміни напруги у вузлах підстанції

Ключові слова: підстанція, перенапруги, розрядник

Рассмотрен вопрос расчета перенапряжений в узловых точках подстанции с вентилянным разрядником методом бегущих волн. Разработан алгоритм численной модели графического решения нелинейного дифференциального уравнения, что позволяет построить графики изменения напряжения в узлах подстанции

Ключевые слова: подстанция, перенапряжения, разрядник

The problem of calculating the surge at the nodal points of the substation with valve-gap method of traveling waves. The algorithm of the numerical model graphics solutions of nonlinear differential equation that allows us to construct graphs of the voltage at the nodes of the substation

Key words: substation, overvoltage, discharger

М.В. Петровский

Кандидат физико-математических наук, доцент*

E-mail: m_asp_ssu@ukr.net

С.Н. Лебеда

Ассистент*

E-mail: lebedka_serg@ukr.net

В.С. Ноздренков

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: sfab@bk.ru

А.В. Панченко*

*Кафедра электроэнергетики

Сумской государственной университет

ул. Р.-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

Контактный тел.: (0542) 33-12-67

Введение

Электрооборудование подстанций подвергается опасным воздействиям атмосферных перенапряжений как при прямых ударах молнии в подстанцию, так и при набегании грозовых волн перенапряжений по линиям электропередачи. Большую опасность для изоляции электрических аппаратов подстанции представляют импульсные волны перенапряжений, приходящие по линиям электропередачи [1].

Для защиты электрооборудования от набегающих волн устанавливаются вентилянные разрядники (РВ) или нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). При этом точка подключения РВ или ОПН в схеме конкретной подстанции должна быть выбрана таким образом, чтобы напряжение на защищаемых объектах было в пределах допустимого. В связи с этим расчет напряжения в узловых точках подстанции является важной практической задачей.

Методика расчета напряжения в узловых точках подстанции методом бегущих волн

Метод бегущих волн, включая в себя правило эквивалентной волны [2], позволяет производить

расчет схем, содержащих ряд узлов. Для этого по правилу эквивалентной волны определяют суммарное напряжение $U_x(t)$ в каждом из узлов, возникающее вследствие прихода в узел волн $U_{mx}(t)$ по всем линиям. Далее вычисляют для каждой из линий волну, распространяющуюся от данного узла к соседнему: $U_{xm} = U_x - U_{mx}$. Каждая из этих условных отраженных волн U_{xm} (с соответствующим смещением во времени) будет для соседнего узла «m» приходящей волной [2].

Для расчета напряжений в узловых точках выбрана подстанция с номинальным напряжением 220 кВ, простейшая схема которой приведенная на рис. 1.

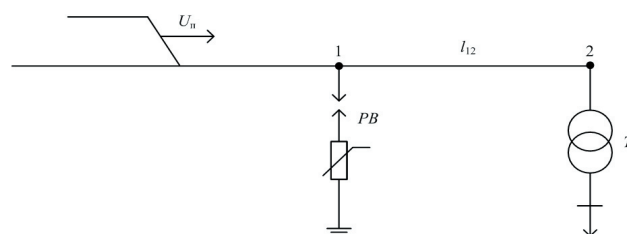


Рис. 1. Схема подстанции

В табл. 1 приведены исходные данные для расчета и характеристики используемого разрядника РВС-220.

Таблица 1

Данные к расчету

U _н , кВ	U _{пр} , кВ	τ _ф , мкс	l ₁₂ , м	W ₁ , Ом	W ₂ , Ом	C _т , пФ	U _{пр} , кВ	U _{ост} , кВ при токах		
								3 кА	5 кА	10 кА
220	900	0,3	36	600	700	1230	530	630	670	734

На рис. 2 изображена схема замещения подстанции, в которой трансформатор заменен входной емкостью.

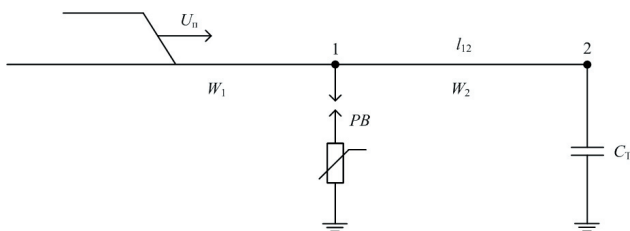


Рис. 2. Схема замещения подстанции

Для расчета напряжений в узловых точках подстанции с РВ сначала рассчитана крутизна набегающей волны перенапряжения:

$$a = \frac{U_{п}}{t_{ф}} = \frac{900}{0,3} = 3000 \frac{\text{кВ}}{\text{мкс}}$$

Затем выбран расчетный интервал времени Δt. В данном случае для получения требуемой точности расчетов принято Δt = 0,1 τ_ф = 0,03 мкс.

Когда срабатывает РВ, то в соответствии с правилом эквивалентной волны, схема замещения подходящих к узлу с разрядником линий представляется в следующем виде (рис. 3):

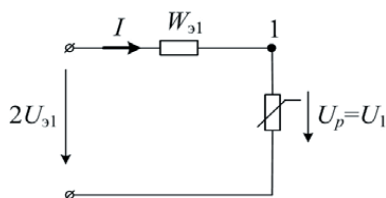


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения узла с разрядником

На основании второго закона Кирхгофа для контура, включающего узел 1, можно записать:

$$2U_{31} = U_p + I \times W_{31}$$

Здесь U₃₁ – эквивалентная падающая волна, входящая в узел 1 по эквивалентной линии (рис. 3), определяемая из формулы:

$$2U'_{31} = a_{11} \times U_{п} + a_{21} \times U'_{21}$$

где U'₂₁ – значение отраженной от точки 2 волны, которая приходит в узел 1 с запаздыванием на время пробега по участку 1–2, то есть

$$U'_{21} = U_{21}(t - t_{12})$$

Напряжение на разряднике:

$$U_p = 2U_{31} - I \times W_{31}$$

Нелинейная вольтамперная характеристика (ВАХ) РВ, заданная тремя точками в табл. 1, заменена отрезками прямых. Уравнения этих отрезков найдены согласно методике, изложенной в [3].

Таким образом, для узла 1, где подключен РВ, используются следующие уравнения для нахождения напряжения U₁:

1. U₁ = 2U₃₁, до пробоя РВ;
2. U₁ = b₁ × 2U₃₁ + d₁, если U_{пр} ≤ 2U₃₁ ≤ U_г;
3. U₁ = b₂ × 2U₃₁ + d₂, если 2U₃₁ > U_г.

Для условий, заданных в табл. 1, параметры уравнений имеют следующие значения: U_г = 1599,2 кВ; b₁ = 0,328; d₁ = 105,3 кВ; b₂ = 0,044; d₂ = 559,7 кВ [3].

Находим волну напряжения, идущую от узла 1 к узлу 2:

$$U_{12} = U_1 - U'_{21} = U_1 - U_{21}(t - t_{12})$$

На основании второго закона Кирхгофа для контура, включающего узел 2, можно записать следующее уравнение:

$$2U_{32} = U_2 + i_2 \times W_{32}$$

из которого можно получить расчетное дифференциальное уравнение в виде:

$$\frac{dU_2}{dt} + \frac{1}{T} U_2 = \frac{1}{T} 2U_{32} \tag{1}$$

где T = W₃₂ × C_т = 700 × 1230 × 10⁻¹² = 0.861 (мкс) .

Здесь U₃₂ – эквивалентная падающая волна, входящая в узел 2 по эквивалентной линии, определяемая из формулы:

$$2U_{32} = \alpha_{22} \cdot U'_{12}$$

Волна, отраженная от узла 2, равна:

$$U_{21} = U_2 - U'_{12} = U_2 - U_{12}(t - t_{12})$$

Значения эквивалентных волновых сопротивлений для каждого узла (W₃₁, W₃₂) и коэффициентов преломления для каждой линии (α₁₁, α₂₁, α₂₂): W₃₁ = 323,08 Ом; W₃₂ = 700 Ом; α₁₁ = 1,077; α₂₁ = 0,923; α₂₂ = 2 [3].

Постоянную времени T необходимо изменить так, чтобы отношение T/Δt было целым числом: уменьшаем расчетное значение T до 0,84 мкс, тогда T/Δt = 0,84/0,03 = 28. Уменьшая T, мы этим как бы уменьшаем C_т и загружаем расчет, т.е. величина напряжения на изоляции трансформатора будет в реальности меньше расчетной.

Для нахождения U₂(t) воспользуемся методом подкасательной [4], который позволяет рассчитать напряжение на емкости при воздействии на неё импульса напряжения произвольной формы. Используя метод подкасательной, произведено построение численной модели, позволяющей реализовать графическую методику решения нелинейного диффе-

ренциального уравнения (1) с помощью алгоритма вычислительной программы. Решение поставленной задачи расчета напряжения в узловых точках подстанции методом бегущих волн реализовано при помощи редактора электронных таблиц MS Excel. Алгоритм построения зависимости $U_2(t)$ поясняется на рис. 4.

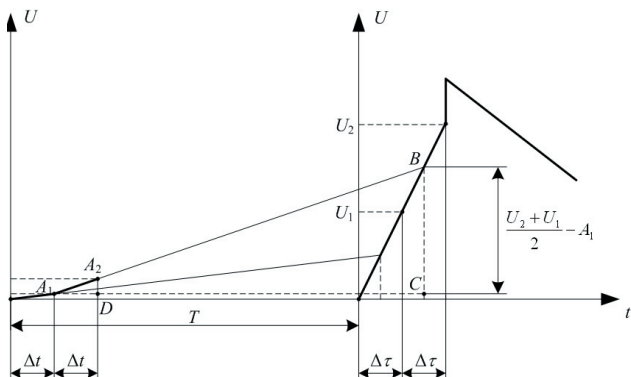


Рис. 4. Построение зависимости $U_2(t)$

Рассмотрим два треугольника ΔA_1A_2D и ΔA_1BC . Выразим стороны как:

$$BC = \frac{U_2 + U_1}{2} - A_1; \quad A_1C = T + \frac{\Delta t}{2}; \quad A_1D = \Delta t.$$

Сторона A_2D равна разности ординат точек A_2 и A_1 .

Треугольники ΔA_1A_2D и ΔA_1BC имеют один общий острый угол и являются прямоугольными. Считаем, что значения A_1 , U_1 , U_2 , T и Δt известны. Исходя из этого, запишем следующие соотношения:

$$\frac{A_1D}{A_1C} = \frac{A_2D}{BC}$$

или

$$\frac{\Delta t}{T + \frac{\Delta t}{2}} = \frac{A_2 - A_1}{\frac{U_2 + U_1}{2} - A_1}.$$

Отсюда выражена координата точки A_2 :

$$A_2 = A_1 + \frac{\left(\frac{U_2 + U_1}{2} - A_1\right) \cdot \Delta t}{T + \frac{\Delta t}{2}}.$$

Таким же способом проводится построение остальных точек (A_3 , A_4 , A_5 , ...), пока график не начнет спадать.

В общем случае алгоритм нахождения ординаты точки A_i на основании определенной ранее точки A_{i-1} может быть записан в виде:

$$A_i = A_{i-1} + \frac{\left(\frac{U_i + U_{i-1}}{2} - A_{i-1}\right) \cdot \Delta t}{T + \frac{\Delta t}{2}}.$$

Результаты численного моделирования напряжения на подстанции

Выполнен расчет перенапряжений на подстанции номинальным напряжением 220 кВ с вентильным разрядником методом бегущих волн с применением информационной модели метода подкасающей.

Результаты расчетов приведены на рис. 5, 6 в виде зависимостей от времени напряжений в точках подключения вентильного разрядника и силового трансформатора.

На рис. 5 показаны перенапряжения на силовом трансформаторе в случае отсутствия на подстанции РВ. Также приведена огибающая волны, набегающей по линии на подстанцию.

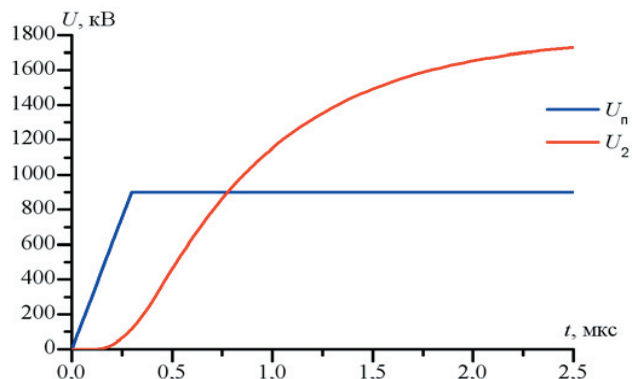


Рис. 5. Перенапряжения на подстанции без РВ:
 $U_{п}$ – набегающая волна перенапряжения;
 U_2 – перенапряжения на силовом трансформаторе

Как видно из рис. 5, перенапряжение на трансформаторе имеет вид аperiodического импульса. Максимальное значение перенапряжения на трансформаторе достигается в установившемся режиме и в 2 раза превышает максимальную амплитуду падающей волны.

При подключении РВ в узле 1 (рис. 2) напряжения на трансформаторе и РВ показаны на рис. 6.

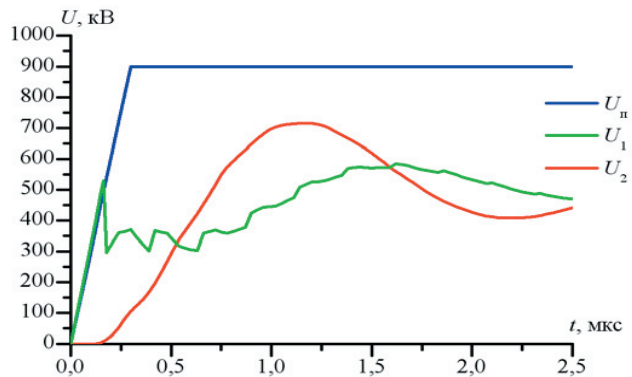


Рис. 6. Перенапряжения на подстанции с РВ:
 $U_{п}$ – набегающая волна перенапряжения;
 U_1 – перенапряжения на РВ;
 U_2 – перенапряжения на силовом трансформаторе

При набегании на подстанцию волны перенапряжения $U_{п}(t)$ с фронтом 900 кВ и крутизной

3000 кВ/мкс, разрядник сработал при напряжении 530 кВ (пробивное напряжение) через 0,165 мкс. Благодаря этому напряжение в узле 1 (U_1) не превысило значения 590 кВ.

Срабатывание разрядника привело к тому, что максимальное значение перенапряжения на трансформаторе достигается в первый максимум свободной составляющей (при $t = 1,17$ мкс) и составляет 716 кВ.

Таким образом, установка на подстанции РВ по пути набегания волны перенапряжения с линии позволяет снизить величину напряжения на изоляции трансформатора в 2,5 раза по сравнению со схемой без РВ.

Заключение

В работе использован алгоритм вычисления напряжения в узловых точках подстанции методом бегущих волн с применением метода подкасатель-

ной. Реализована численная модель графического решения нелинейного дифференциального уравнения методом подкасательной. Реализация процесса вычисления производилась в редакторе электронных таблиц Excel.

Показано, что в простейшей схеме эффективное ограничение перенапряжения, возникающее на обмотке высоковольтного трансформатора, может быть реализовано включением в его питающую сеть вентильного разрядника.

Благодаря применению вентильного разрядника для защиты трансформатора, удалось достичь снижения перенапряжения на обмотке высшего напряжения трансформатора в 2,5 раза по сравнению со схемой без вентильного разрядника.

Проведенные расчеты показывают, что перспективным направлением дальнейших исследований является установление закономерностей влияния места включения РВ и формы ВАХ его нелинейного элемента на величины перенапряжений на подстанции.

литература

1. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / Под общей редакцией В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 463 с.
2. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчет переходных процессов и перенапряжений. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 328 с.
3. Кузнецов Ю.И. Расчет напряжения в узловых точках подстанции методом бегущих волн. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 36 с.
4. Перенапряжения в электрических системах и защита от них / Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю. А. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение. – 1995. – 320 с.