

ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ.

Федор М. Ерхан – д.т.н., Государственный Аграрный Университет Молдовы

Постановка проблемы. Функциональная надежность установленного электротехнического оборудования в узлах распределительных сетей электроэнергетических систем является функцией от ряда факторов, которые носят вероятностный характер. Одним из этих факторов являются переходные процессы, которые очень часто сопровождаются возникновением электрической дуги. В предложенной статье предлагается использовать метод Годунова для анализа переходных процессов сопровождаемых возникновением электрической дуги на контактах электрооборудования.

Ключевые слова: Переходные процессы, электроэнергетические системы, функциональная надежность электрооборудования и выключателей, восстанавливающееся переходное напряжение, уравнение непрерывности электрической дуги, несимметричные режимы, уравнение сохранения аксиальной проекции импульса, уравнение сохранения энергии импульса.

Раскрытие проблемы.

Переходные процессы, возникающие в электроэнергетических системах, имеют существенное влияние на функциональную надежность большинства элементов системы и особенно на распределительные устройства и выключателей.

Для анализа переходных процессов в распределительных сетях исследования проводились на сборных шинах напряжением $U_H = 10\text{кВ}$ трансформаторной подстанции напряжением $U_H - 330/110/10\text{кВ}$. принципиальная однолинейная

структурная электрическая схема, которой приведена на рис.1. Возникающие переходные процессы в узлах ЭЭС являются функцией нескольких составляющих, таких как отключаемые токи, переходное восстанавливающееся напряжение, параметры возникающей электрической дуги и скорости их изменения во времени. Перечисленные составляющие, переходных процессов согласно [1-3] могут быть описаны следующими дифференциальными уравнениями:

а) скорость изменения тока в электрической дуге во времени согласно [1] может быть представлено согласно уравнению (1).

$$\frac{di_D}{d\tau} = d(I_m e^{-j\omega\tau}) / d\tau \quad (1)$$

где: $di_D / d\tau$ - скорость изменения тока электрической дуги;

I_m - амплитудное значение отключаемого тока .

б) скорость изменения напряжения электрической дуге во времени согласно [3] может быть представлено согласно уравнению (2).

$$\frac{du_D}{d\tau} = Zv \frac{n}{n-1} \frac{di_D}{d\tau} \quad (2)$$

где: $du_D / d\tau$ - скорость изменения напряжения электрической дуги. Электрическая дуга сопровождается выделением определенного количества тепла, значение

которого аналитически может быть определена согласно уравнению (3).

$$\frac{dQ}{d\tau} = -Q_0 \left(\frac{1}{i_D^{-1}} \frac{di_D^{-1}}{d\tau} \cdot \frac{1}{U_D} \frac{dU_D}{d\tau} \right) = -Q \left[\frac{dU_D}{U_D} \cdot \left(\frac{dU_D}{i_D} \right)^{-1} \right] \frac{1}{d\tau} \quad (3)$$

где: $dQ/d\tau$ - скорость изменения выделяемого тепла в электрической дуге; Z_v - волновое сопротивление контура, где имеет место переходной процесс. N - количество линий, присоединенных к шинам, где установлен выключатель и имеет место переходной процесс согласно рис.1. I_m - амплитудное значение отключаемого тока; ω - угловая частота переменного тока.

Приведенные дифференциальные уравнения являются нелинейными, аналитические решения, которых весьма затруднительны. Для решения уравнений типа (1-3) может быть использован метод Годунова,

который согласно [4] позволяет переходить от нелинейных функций и соответствующих дифференциальных уравнениях, которые описывают переходные процессы, к эквивалентным линейным функциям и получить конкретные значения параметров, характеризующих переходные процессы и электрические дуги в распределительных устройствах не зависимо от их типа и выключателях. Переход такого типа облегчает проведения расчетов переходных процессов, возникающих в распределительных сетях. Полученные результаты расчетов переходных процессов и описание электрической дуги в высоковольтных выключателях различного типа, при использовании метода Годунова, показывает их высокую степень точности и соответствие опыту эксплуатации.

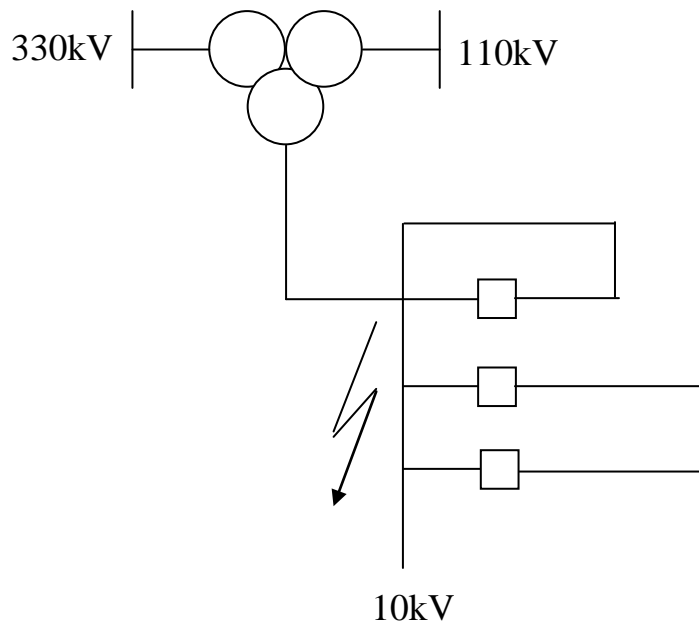


Рис. 1 . Принципиальная структурная схема исследуемой трансформаторной подстанции напряжением U_H - 330/110/10кВ.

Это способствует упрощению математической модели и соответствующего описания электрической дуги по сравнению с [1-3].

Все это дает основание считать, что использование метода Годунова, облегчает проведения соответствующих расчетов и способствует повышению точности расчета параметров переходных процессов в электроэнергетических системах и более детальное и точное определение функциональной надежности установленного электрооборудования (в частности высоковольтных выключателей разного типа) при расчете переходных процессов в электроэнергетических системах.

Процесс изменения составных частей эквивалентного значения восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса приведена на рис.2.

Переходные процессы, которые возникают в результате несимметричных режимов, могут иметь различные формы и продолжительность. Они сопровождаются электрическими дугами, которые возникают при различных видах коротких замыканиях.

Основой для разработки математической модели для мгновенных значений параметров электрической дуги в данном случае являются уравнения непрерывности, сохранения импульса и энергии и закон Ома.

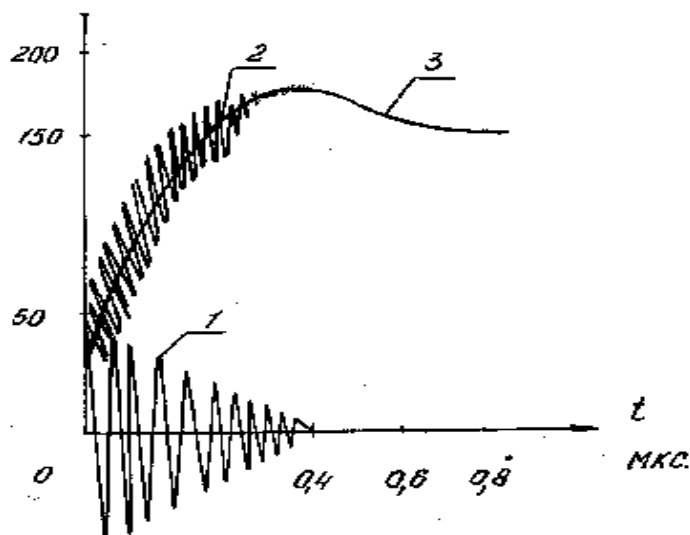


Рис. 2. Составные части восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса и их изменение во времени

1. Восстанавливающееся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны электрической сети;
3. Восстанавливающееся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны источника питания;
2. Суммарное восстанавливающееся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса.

Выше перечисленные уравнения могут быть представлены следующим аналитическими выражениями:

а) уравнение непрерывности электрической дуги имеет форму (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_z) \frac{\partial v_z}{\partial z} + (r \rho v_r) \frac{\partial v_z}{r \partial r} = 0 \quad (4)$$

б) уравнение сохранения аксиальной проекции импульса имеет форму (5):

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \rho v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} [(\eta + \eta_r) r \frac{\partial v_z}{\partial r}] = 0 \quad (5)$$

С учетом вышеприведенных условий, уравнение сохранения энергии импульса имеет форму (6):

$$\rho \frac{\partial h_0}{\partial t} + \rho v_z \frac{\partial h_0}{\partial z} + \rho v_r \frac{\partial h_0}{\partial r} = \sigma E^2 - U + \frac{\partial}{\partial r} [(k + k_T) r \frac{\partial T}{\partial r}] \quad (6)$$

Если соблюдаются условия, описываемые уравнениями (4-6), то закон Ома может быть представлен в виде (7):

$$I = E \int_0^{r_1} 2\pi \sigma r dr = 2\pi E \int_0^{r_1} \sigma r dr \quad (7)$$

где: ρ - плотность среды; V_z - осевая, V_r - радиальная компоненты скорости среды; p - давление; η - вязкость среды; η_T - турбулентная вязкость; E - напряженность; σ - электропроводность; U - эффективный коэффициент излучения; h_0 - полная энталпия; k - молекулярная теплопроводность; k_T - турбулентная теплопроводность; r - радиус дуги.

Если уравнения (4-6) интегрировать по радиусу r с учетом соблюдения соответствующих пределов $a \leq r \leq b$ то они получают форму уравнения (8).

а) уравнение непрерывности состояния

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_a^b 2\pi \rho v_z r dr + \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b 2\pi \rho v_r r dr + q(b) - q(a) - \lambda(b) + \lambda(a) = 0 \quad (8)$$

б) уравнение сохранения аксиальной проекции импульса примет форму (9)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_a^b 2\pi \rho h_0 r dr + \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b 2\pi \rho v_r^2 r dr - \Phi(b) + \Phi(a) + q(b) v_z(b) - q(a) v_z(a) = \frac{\partial}{\partial z} \rho \pi^2 (b^2 - a^2) - 2\pi [b S(b) - a S(a)] \quad (9)$$

При этих условиях уравнение сохранения энергии импульса будет иметь форму уравнения (10).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_a^b 2\pi \rho v_z r dr + \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b 2\pi \rho v_r h_0 r dr - \Psi(b) + \Psi(a) + q(b) h_0(b) - q(a) h_0(a) = \int_a^b 2\pi r [\sigma E^2 - U] dr - 2\pi [W(a) - W(b)] \quad (10)$$

В приведенных уравнениях используются следующие обозначения:

$q(a), q(b)$ - потоки массы в радиальном направлении через границу раздела среды a и b ;

λ, Φ, Ψ - функции перемен времени, d, ρ, v_z, h_0 на этих же границах;

$S(a), S(b)$ - функции характеризующие радиальный поток импульса и энергии через границу раздела среды $r = b$, которое определяется аналитическими соотношениями (11-14):

$$S(a) = [(\eta + \eta_r) \frac{\partial v_z}{\partial r}]_{r=a} \quad (11)$$

$$S(b) = [(\eta + \eta_r) \frac{\partial v_z}{\partial r}]_{r=b} \quad (12)$$

$$W(a) = [(k + k_T) \frac{\partial T}{\partial r}]_{r=a} \quad (13)$$

$$W(b) = [(k + k_T) \frac{\partial T}{\partial r}]_{r=b} \quad (14)$$

Приведенные интегральные уравнения (8-10) могут характеризовать переходной процесс сопровождаемый электрической дугой, возникающей

на контактах электрооборудования в зависимости от скорости протекания переходного процесса и месте его нахождения относительно рассматриваемого электрооборудования.

Приведенные нелинейные уравнения, используя метод Годунова, можно линеаризировать и в таком случае переходной процесс и процесс гашения электрической дуги на контактах электрооборудования можно рассматривать при помощи линейных эквивалентных уравнений, в результате чего полученные решения достаточно обоснованно описывают соответствующие явления.

Выводы.

Использование метод Годунова для анализа переходных процессов сопровождаемых возникновением электрической дуги на контактах электрооборудования позволяет нелинейные кривые и соответствующие дифференциальные уравнения, которые могут изображать данные процессы линеаризировать по определенным участкам и переходить от дифференциально-интегральных уравнений, которые описывают данный процесс к эквивалентным линейным уравнениям.

Литература

1. Frind G., Rich J. Recovery speed of axial flow gas blast interrupter dependence on pressure and di/dt in SF – IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1974, vol.93, № 5, p.1675-1682.
2. Browne T. Practical modelling of the circuit breaker arc as a schort line fault interrupter.-IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1978, vol.97, №3, p.838-845.

3.Hermann W., Ragaller K. Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers - IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1977, vol.96, №5, p.1546 – 1552.

4.Годунов С.К. Уравнения математической физики. М.: Наука.,1979.388с.

5.Erhan F., Melnic S. Short-circuit current level effect on the electric power systems reliaility – III International Symposion Short-Circuit Current in a Power System. Sulejow, Polond.,1988, т1, стр.80-89.

6.Неклепаев Б.Н. Элекрическая часть электростанций и подстанций.,М.:Энергоатомиздат,1989.657с

Аннотация

*к статьи Ерхана Ф.М.
“Принципы оценки переходных процессов в электротехнических устройствах.”*

В приведенной работе предложено использовать метод Годунова для описания и анализа переходных процессов сопровождаемые электрической дугой, которые могут возникнуть в распределительных сетях на контактах электрооборудования различного класса напряжений.

Adnotare

la articolul lui Erhan F.

“ Principiile de apreciere a proceselor tranzitorii în echipamentele electrotehnice.”

În lucrarea dată se propune de a folosi metoda Godunov pentru a precăuta și analiza procesele tranzitorii ce sunt însoțite de arcul voltaic, care apar în rețelele de distribuție la bornele echipamentelor electrotehnice de diverse niveluri de tensiuni.



**Abstract
of the topic Erchan F. "The
principles of the estimation of the
transition processes in
electrotechnical equipment"**

In brought work is offered use the method Godunova for description and analysis of the transition processes accompanied by electric arc, which can appear in distributing set on contact electrotechnical equipment different class of the voltages.