УДК 621.311.01.064.03

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГОДУНОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Докт. техн. наук ЕРХАН Ф. М.

Государственный аграрный университет Молдовы

Переходные процессы, возникающие в электроэнергетических системах (ЭЭС), существенно влияют на функциональную надежность многих элементов системы, особенно на распределительные устройства и выключатели.

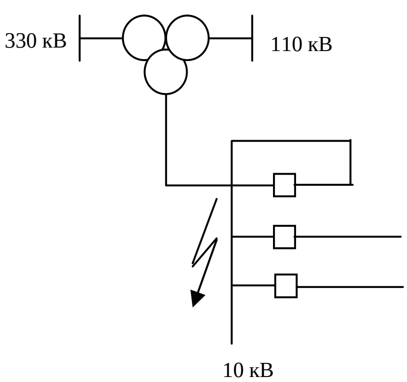

Рис. 1

Анализ переходных процессов в распределительных сетях проводился на сборных шинах напряжением $U_н$ = 110 кВ трансформаторной подстанции напряжением $U_н$ = 330/110/10 кВ, принципиальная однолинейная 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 электрической дуги и скорость их изменения во времени, которые, согласно [1–3], могут быть описаны следующими дифференциальными уравнениями скорости изменения:

а) тока в электрической дуге во времени [1]

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

где $di_D/d\tau$ – скорость изменения тока электрической дуги; I_m – амплитудное значение отключаемого тока;

б) напряжения электрической дуги во времени, согласно [3]:

$$\frac{du_D}{d\tau} = Zv\,\frac{n}{n-1}\,\frac{di_D}{d\tau}\,, \tag{2}$$

где $du_D/d\tau$ – скорость изменения напряжения электрической дуги; Zv – волновое сопротивление контура, где имеет место переходной процесс.

Электрическая дуга сопровождается выделением определенного количества теплоты, значение которого аналитически может быть определено по уравнению

$$\frac{dQ}{d\tau} = -Q_0\left(\frac{1}{i_д^{-1}}\,\frac{di_д^{-1}}{d\tau}\,\frac{1}{U_д}\,\frac{dU_д}{d\tau}\right) = -Q\left[\frac{dU_д}{U_д}\left(\frac{dU_д}{i_д}\right)^{-1}\right]\frac{1}{d\tau}\,, \tag{3}$$

где $dQ/d\tau$ – скорость изменения выделяемой в электрической дуге теплоты; n – количество линий, присоединенных к шинам, где установлен выключатель и имеет место переходной процесс (рис. 1); ω – угловая частота переменного тока.

Приведенные дифференциальные уравнения являются нелинейными, аналитические решения весьма затруднительны. Для решения уравнений типа (1)…(3) может быть использован метод Годунова, который, согласно [4], позволяет переходить от нелинейных функций и соответствующих дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы, к эквивалентным линейным функциям и получить конкретные значения параметров, характеризующих переходные процессы и электрические дуги в распределительных устройствах и выключателях. Переход такого типа облегчает проведение расчетов переходных процессов в распределительных сетях.

Полученные результаты расчетов переходных процессов по методу Годунова и описание электрической дуги в высоковольтных выключателях различного типа свидетельствуют об их высокой степени точности и соответствии опыту эксплуатации, что упрощает математическую модель и соответствующее описание электрической дуги по сравнению с [1…3]. Все это дает основание считать, что использование метода Годунова облегчает проведение расчетов и способствует повышению точности расчета параметров переходных процессов в ЭЭС и более детальному и точному определению функциональной надежности электрооборудования (в частности, высоковольтных выключателей разного типа).

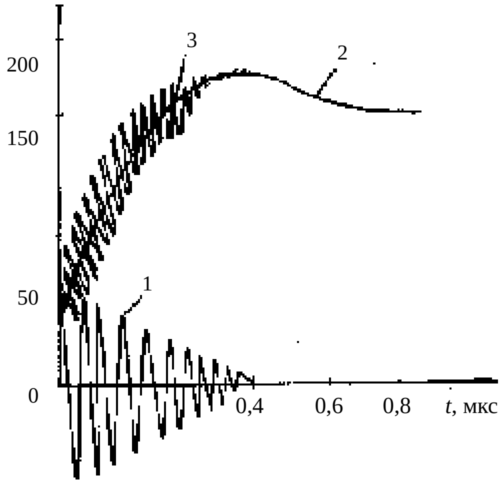

Рис. 2. Составные части восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса и их изменение во времени: 1 – восстанавливающееся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны электрической сети; 2 – то же источника питания; 3 – суммарное восстанавливающееся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса

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

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

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

Перечисленные выше уравнения могут быть представлены следующими аналитическими выражениями:

а) уравнением непрерывности электрической дуги

$$\partial\rho/\partial t + (\rho v_z)\,\partial v_z/\partial z + (r\rho v_r)\,\partial v_z/r\partial r = 0; \qquad (4)$$

б) уравнением сохранения аксиальной проекции импульса

$$\rho\partial v_z/\partial t + \rho v_z\partial v_z/\partial z + \rho v_r\partial v_z/\partial r =$$

$$= -\partial\rho/\partial z + \partial\,[(\eta+\eta_r)r\partial v_z/\partial r]/r\partial r. \qquad (5)$$

Следовательно, уравнение сохранения энергии импульса

$$\rho\partial h_0/\partial t + \rho v_z\partial h_0/\partial z + \rho v_r\partial h_0/\partial r =$$

$$= \sigma E^2 - U + \partial\,[(k + k_т)r\partial T/\partial r]/r\partial r. \qquad (6)$$

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

$$I = E\int_0^{r1} 2\pi\sigma\, rdr = 2\pi E\int_0^{r1} \sigma\, rdr, \qquad (7)$$

где ρ – плотность среды; v_z – осевая; v_r – радиальная компонента скорости среды; p – давление; η – вязкость среды; $\eta_т$ – турбулентная вязкость; E – напряженность; σ – электропроводность; U – эффективный коэффициент излучения; h_0 – полная энтальпия; k – молекулярная теплопроводность; $k_т$ – турбулентная теплопроводность; r – радиус дуги.

Если уравнения (4)–(6) интегрировать по радиусу r с учетом соблюдения соответствующих пределов $a \le r \le b$, то они приобретут форму уравнений:

а) непрерывности состояния

$$\partial\int_a^b 2\pi\,\rho v_z rdr/\partial t + \partial\int_a^b 2\pi\,\rho v_r rdr/\partial z + q(b) - q(a) - \lambda(b) + \lambda(a) = 0; \qquad (8)$$

б) сохранения аксиальной проекции импульса

$$\partial\int_a^b 2\pi\,\rho h_0 rdr/\partial t + \partial\int_a^b 2\pi\,\rho v^2_r rdr/\partial z - \Phi(b) + \Phi(a) + q(b)v_z(b) - q(a)v_z(a) =$$

$$= \partial\rho\pi^2(b^2 - a^2)/\partial z - 2\pi[bS(b) - aS(a)]. \qquad (9)$$

При этих условиях уравнение сохранения энергии импульса будет иметь форму

$$\partial\int_a^b 2\pi\,\rho v_z rdr/\partial t + \partial\int_a^b 2\pi\,\rho v_r h_0 rdr/\partial z - \Psi(b) + \Psi(a) + q(b)h_0(b) - q(a)h_0(a) =$$

$$= \int_a^b 2\pi\, r[\sigma E^2 - U]dr - 2\pi[W(a) - W(b)], \qquad (10)$$

где $q(a)$, $q(b)$ – потоки массы в радиальном направлении через границу раздела сред 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 $r = b$, которые определяются аналитическими соотношениями:

$$S(a) = [(\eta + \eta_r)\, \partial v_z/\partial r]_{r=a}; \tag{11}$$

$$S(b) = [(\eta + \eta_r)\, \partial v_z/\partial r]_{r=b}; \tag{12}$$

$$W(a) = [(k + k_r)\, \partial T/\partial r]_{r=a}; \tag{13}$$

$$W(b) = [(k + k_r)\, \partial T/\partial r]_{r=b}. \tag{14}$$

Приведенные интегральные уравнения (8)–(10) могут характеризовать переходной процесс, сопровождаемый электрической дугой на контактах электрооборудования в зависимости от скорости протекания переходного процесса и места его нахождения относительно рассматриваемого электрооборудования.

Указанные 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.

ВЫВОД

Использование метода Годунова для анализа переходных процессов, сопровождаемых электрической дугой на контактах электрооборудования, позволяет линеаризировать нелинейные дифференциальные уравнения 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_6 // 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. – 388 с.
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, Poland, 1988. – T. 1. – C. 80–89.
6. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 657 с.

Представлена кафедрой
электротехники

Поступила 8.10.2004