УДК 621.03

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДУГОВЫХ ПРОЦЕССАХ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

ГАСАНОВ К.А.

Азербайджанский Технический Университет

Нестационарные дуговые процессы являются следствием часто встречающихся коротких замыканий при аварийных случаях в сетях 6-35 кВ. Обычно такие сети имеют относительно короткие участки и, поэтому, описываются интегродифференциальными уравнениями. Описания физических процессов интегродифференциальными уравнениями требует точного учета нулевых и краевых условий, которые зависят от факторов, связанных с режимами аварийных случаев.

Целью настоящей статьи является применение методов дискретных преобразований к такого рода многофункциональным задачам [1,2]. В этом отношении статья является методической новизной, где применяется дискретное и интегральное преобразования в переходном процессе короткого замыкания. Хотя процесс несложный, но повторение дуги и подзарядки линий электропередачи при каждом обрыве тока дуги сопровождены сложными электромагнитными колебаниями. Суть методики интегральных преобразований и обобщенных функций выражается следующим образом. Пусть напряжения задается в виде постоянной или синусоидальной функции. При дуговом замыкании появляются функции высокочастотных составляющих коммутируемой цепи. При данной методике возможен учет как сосредоточенных, так и распределённых параметров цепи. В случае, когда напряжение или ток выражаются функцией заданной синусоидальной формы, учитывая структуры цепи, можно описать процесс для напряжения в следующем операторном виде:

$$U(p) = I(p) \cdot \frac{F(p)}{H(p)} \tag{1}$$

Оригинал от такой функции отыскиваются поэтапно. Сначала по изображению Z(p) вычисляется функция оригинала: - $Z(p) = \dfrac{F(p)}{H(p)} \Rightarrow z(t)$ в следующем рекуррентном виде:

$$z(t) \approx z[n] = \frac{f[n]}{Th[0]} - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{z[n] \cdot h[n-m]}{h[0]} \tag{2}$$

Затем аналогично вычисляется функция тока $I(p) = E(p)/Q(p)$ и его оригинал:

$$i[n] = \frac{e[n]}{Tq[0]} - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{i[n] \cdot q[n-m]}{q[0]} \tag{3}$$

После всего проводится расчет напряжения в следующем виде:

$$u[n] = T\sum_{m=0}^{n} i[n] \cdot z[n-m] \tag{4}$$

Составляющие функции F(p), E(p) изначально содержат все переменные условия цепи (начальные и краевые), связанные с аварийными коммутациями. Функция H(p) зависит от предвключенной и нагрузочной цепи и, поэтому, называется характеристическим уравнением. Необходимо отметить, что по этой методике возможен учет условия зажигания и погасания дуги как по основной, так и по высокочастотной составляющим величин токов и напряжений [3,4]. Это является основным преимуществом данной методики.

В нашем случае для простоты иллюстрации метода расчетными параметрами схемы принимаются: индуктивность трансформатора, ёмкость проводов ЛЭП, а также подключенные в разные точки схемы активные сопротивления. На первом этапе значения активных сопротивлений принимаются постоянными, как в линейных схемах. Известные системы интегральных преобразований построены в предположении, что в операторном виде применяются для решения составленных уравнений функции с ограниченной показательной вариацией.

По расчетной схеме составляется система интегродифференциальных уравнений в операторном виде. В эти уравнения заранее вводятся начальные значения фазовых напряжений на емкостях и токи в индуктивностях. Эти значения учитываются в расчетах посредством моделирующих обобщенных $\delta(\tau)$ и $\delta'(\tau)$ функций при переходе к оригиналам. Начальные условия совпадают с моментами зажигания и погасания перемежающиеся дуги. По известным теориям в расчетах начальные значения фазовых токов принимаются равными нулю, так как ток дуги обрывается при переходе через нулевые значения.

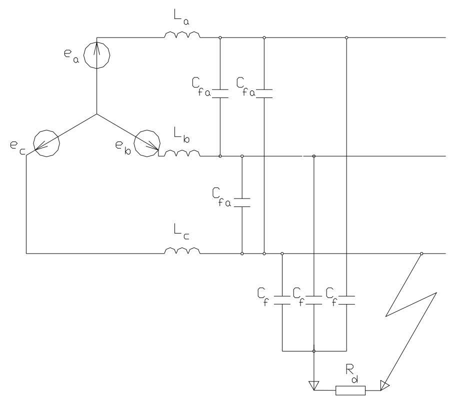

Рис.1 Расчетная схема однофазного короткого замыкания ЛЭП с изолированной нейтралью

Обращаясь к составлению уравнений цепи в области изображений, обычно переходят к операторной схеме замещения, которая является схемным отображением связей между изображениями напряжений и токов. В операторной схеме источники гладкой и перерывистой формы представляются как источники напряжения $U_+(p) = U_-(p)$ и тока $I_+(p) = I_-(p)$. Источники импульсов сохраняются в операторной схеме и представляются своими амплитудами в случае перехода в область оригинала по правилам обратного -Ł- преобразования. При применении преобразования –Ł+ источники импульсов исключаются из операторных схем, поскольку *Ł+[δ(τ)]=0.*

Непосредственно после замыкания на землю фазы А емкость относительно земли неповрежденной фазы C_fι, заряженная до напряжения $u_c(t_1)$, соединяется параллельно с междуфазовой емкостью $C_{мф}$ι, находящейся под напряжением $u_{ca}(t_1)$. Напряжения на двух параллельных емкостях мгновенно уравниваются и приобретают одинаковое значение $u_{нач}$, которое определяется из баланса зарядов следующим образом:

$$u_{nah} = \frac{C_f \cdot u_c(t_1) + C_{mf}\left[u_c(t_1) - u_a(t_1)\right]}{C_f + C_{mf}} = u_c(t_1) - k \cdot u_a(t_1) \qquad (5)$$

$$\text{здесь,} \quad k = C_{mf} / \left(C_f + C_{mf}\right) \qquad (6)$$

Обычно $C_{мф}=(0.25\div 0.3)C_ф$ *и* $к=0.2\div 0.25$. Мгновенные значения напряжений $u_c(t_1)$ и $u_a(t_1)$ имеют разные знаки.

Полная система уравнений по расчетной схеме рис.1 приводится ниже:

$$\left.\begin{aligned}
&I_a(p)=\left[pC^{ii}+\left(\frac{1}{R_d}+\frac{1}{R_a}\right)\right]\cdot U_a(p)-\frac{U_a(0)}{p}-pC_{mf}U_b(p)-pC_{mf}U_c(p)\\
&I_b(p)=-pC_{mf}U_a(p)+\left(pC^{ii}+\frac{1}{R_b}\right)\cdot U_b(p)-\frac{U_b(o)}{p}-pC_{mf}U_c(p)\\
&I_c(p)=-pC_{mf}U_a(p)-pC_{mf}U_b(p)+\left(pC^{ii}+\frac{1}{R_c}\right)\cdot U_c(p)-\frac{U_c(0)}{p}\\
&U_a(p)=E_m\left(\frac{p\sin\varphi_a+\omega\cos\varphi_a}{p^2+\omega^2}\right)-U_n(p)+I_a(p)\cdot\frac{pL_a}{1+R_a/pL_a}\\
&U_b(p)=E_m\left[\frac{p\sin(\varphi_a-120+\varphi_b)+\omega\cos(\varphi_a-120+\varphi_b)}{p^2+\omega^2}\right]-U_n(p)+I_b(p)\cdot\frac{pL_b}{1+R_b/pL_b}\\
&U_c(p)=E_m\left[\frac{p\sin(\varphi_a+120+\varphi_c)+\omega\cos(\varphi_a+120+\varphi_c)}{p^2+\omega^2}\right]-U_n(p)+I_c(p)\cdot\frac{pL_c}{1+R_c/pL_c}\\
&I_0(p)=\frac{U_a(p)+U_b(p)+U_c(p)}{3R_d}
\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Здесь, $C''=C_ф+C_{мф}$ –сумма фазовых и междуфазовых емкостей проводов и изоляции ЛЭП при возникновении дуги. В момент замыкания они соединяются последовательно. $R_д$ - сопротивление земли на нейтраль рассматриваемой системы при возникновении дуги; R_a, $R_б$,R_c –активные сопротивления последовательных фазовых обмоток источника и трансформатора.

В области оригинала произведение двух операторных функций выражается в виде интеграла свертки [5]. По составленным операторным функциям (7) переход к оригиналу производится поэтапно. При этом используются свойства линейности преобразований Лапласа. Отыскание оригинала предложенным способом дает возможность провести анализ развития колебательных процессов при перемежающейся дуге между проводом одной фазы ЛЭП и землей.

Теперь обратимся к отысканию оригиналов по уравнениям (7). Линейность Лапласовых и интегральных преобразований остается в силе и в области оригинала. Для упрощения вычисления разделим правую и левую часть всех уравнений системы (7) на p. После, сгруппировав уравнения по токам и напряжениям фаз, получим следующие выражения:

- для токов,

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{I_a(p)}{p}=\left[C^{11}+\frac{1}{p}\left(\frac{1}{R_d}+\frac{1}{R_a}\right)\right]\cdot U_a(p)-C_{mf}\left[U_b(p)+U_c(p)\right]-\frac{U_a(0)}{p^2}\\
&\frac{I_b(p)}{p}=-C_{mf}U_a(p)+\left(C^{11}+\frac{1}{pR_b}\right)\cdot U_b(p)-C_{mf}\cdot U_c(p)-\frac{U_a(0)}{p^2}\\
&\frac{I_c(p)}{p}=-C_{mf}U_a(p)-C_{mf}U_b(p)+\left(C^{11}+\frac{1}{pR_c}\right)\cdot U_c(p)-\frac{U_a(0)}{p^2}\\
&\frac{I_0(p)}{p}=\frac{U_a(p)+U_b(p)+U_c(p)}{3pR_d}
\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

-при записи уравнений для напряжения принимается симметричный случай параметров источника, как заданная начальная фаза - φ_a и $\varphi_б=\varphi_c=0$; $R_a=R_б=R_c=R$ *и* $L_a=L_б=L_c=L$

$$\left.\begin{aligned}
\frac{U_a(p)}{p} &= E_m\left[\frac{\sin\varphi_a}{p^2+\omega^2}+\frac{\omega\cos\varphi_a}{p\left(p^2+\omega^2\right)}\right]-\frac{U_n(p)}{p}+I_a(p)\cdot\frac{pL}{p+R/L}\\
\frac{U_b(p)}{p} &= E_m\left[\frac{\sin\left(\varphi_a-120^0\right)}{p^2+\omega^2}+\frac{\omega\cos(\varphi_a-120)}{p\left(p^2+\omega^2\right)}\right]-\frac{U_n(p)}{p}+I_b(p)\cdot\frac{pL}{p+R/L}\\
\frac{U_c(p)}{p} &= E_m\left[\frac{\sin(\varphi_a+120)}{p^2+\omega^2}+\frac{\omega\cos(\varphi_a+120)}{p\left(p^2+\omega^2\right)}\right]-\frac{U_n(p)}{p}+I_c(p)\cdot\frac{pL}{p+R/L}\\
U_n(p) &= U_a(p)+U_b(p)+U_c(p)
\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

Как оговорено выше, в симметричном режиме до короткого замыкания начальное напряжение было принято равным нулю - $u_н(t_1)=0$. Как видно из уравнений (9), после короткого замыкания напряжение на нейтрали определяется простым суммированием мгновенных значений напряжений на каждой фазе.

Расчет начинается с подсчета напряжения и тока поврежденной фазы. Пусть дуга начинает гореть на фазе А в момент φ_a, близкий к 270^0. Когда $u_a(t_1)=-U_ф$; $u_c(t_1)=0.5U_ф$; $u_{нач}=(0.5+к)U_ф>u_c(t_1)$. В этот момент через место замыкания на землю будет проходить ток $3\omega C_ф U_ф$. В расчетах примем расчетный шаг, для чего можно исходить из постоянного времени, как L/R или $1/\sqrt{LC^{11}}$. Выбрав какой- нибудь из этих величин равной τ и разбивая ее на n частей, получаем расчетный шаг $T=\tau/n$. Далее, проводим расчет интегрирования с шагом–T. Значения напряжения на фазе А в любое время будет меняться как:

$$\begin{aligned}
&\int_0^t 1(t-\tau)\, u_a(t)d\tau = E_m\left[\sin\varphi_a\sin\omega t+\cos\varphi_a(1-\cos\omega t)\right]-\int_0^t 1(t-\tau)u(t)dt+\\
&+L\int_0^t i_a(t)\cdot\left[\exp\left(-(t-\tau)R/L\right)\right]'dt
\end{aligned} \qquad (10)$$

В зависимости от дискретных n и параметров, приведенных к относительным величинам напряжения на фазе А, при $\varphi_a=270^0$ *и* $\cos\varphi_a=0$, $\sin\varphi_a=-1$, $\omega=1$, $E_м=1$, $R_* = R\big/\sqrt{L/C''}$ *и* $L_* = \omega L\big/\sqrt{L/C''}$ будет определяться следующим образом:

$$u_a[n] = -(\sin t) - T\sum_{m=0}^{n} u_n[n] - TR_*\sum_{m=0}^{n} i_a[n]\cdot\exp\left[-\left(R_*/L_*\right)(n-m)\right]-\sum_{m=0}^{n-1}u_a[n] \qquad (11)$$

В формуле (11) правая часть содержит значение неизвестного тока на фазе А. Поэтому для расчета i_a [n] обращаются к первому выражению системы уравнений (8). Но для определения i_a [n] сначала вычисляют u_c[n] и $u_б$[n]. При отыскании оригинала по методу теоремы вычетов получают:- $u_c[n]=u_{ca}[n]-u_a(t_1)\cdot(1-к)\cdot e^{-(nT)R/L}\cdot\cos(nT/\sqrt{LC''})$; $u_б[n]=u_{бa}[n]-u_a(t_1)\cdot(1-к)\cdot e^{-(nT)R/L}\cdot\cos(nT/\sqrt{LC''})$. Но в данном случае вычисления производятся по вторым и третьим выражениям системы уравнений (8) и (9). Полученные кривые напряжения от nT иллюстрируются на рис.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из кривых напряжения и тока, напряжение на здоровой фазе $u_{смах}$ достигает $3.4\cdot E_м$. Представленная методика даёт возможность провести расчеты с учетом внезапного изменения параметров цепи, в частности, сопротивления-$R_д$ при перемежающейся дуге. Расчеты проводятся численным методом, но при этом наглядно прослеживаются влияния параметров на короткое замыкание и развитие процесса электромагнитных колебаний.

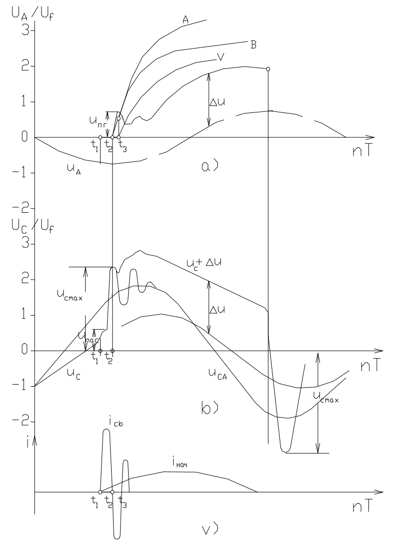

Рис.2. Напряжения переходного процесса при дуговом КЗ в ЛЭП с изолированной нейтралью : а – напряжения фазы А; б – напряжения фазы С; в – ток в месте к.з.

---

1. *В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь.* Техника высоких напряжений Изоляция и перенапряжения в электрических системах М. Электроатомиздат 1987 г.
2. *А.С. Розенфельд, Б.И. Яхинсон.* Переходные процессы и обобщенные функции Изд. Наука Ф-М литер. М. 1966 г.
3. *К. А. Гасанов.* Расчеты перенапряжений в цикле АПВ с помощью Z-преобразования М. МЭИ 1978 г.
4. *Э. Джури.* Импульсные системы автоматического регулирования Гос. Изд. Ф.М. литературы М. 1963 г.
5. *Ч.М. Джуварлы.* К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью. Электричество, № 6, 1953 г.

UZUN XƏTTLƏRDƏ QEYRİ STASİONAR QÖVS PROSESLƏRİNİN İNTEQRAL ÇEVİRMƏLƏR METODU İLƏ ELEKTRİK HESABATLSRI

HƏSƏNOV Q.Ə.

6-35 kV şəbəkələrdə baş verən qısaqapanmalar çox hallarda qeyri stasionar yanan-sönən qövs proseslərinə səbəb olur. Adətən belə şəbəkələr qısa məsafələri əhatə etdiyindən bu proseslər inteqro-diferensial tənliklərlə ifadə edilir. İnteqro-diferensial tənliklərin həlli isə, qısaqapanma və dəyişən qövs halları üçün başlangıc və sərhəd şərtlərinin dəqiq nəzərə alınmasını tələb edir.

ELECTRIC CALCULATIONS IN LONG LINES AT NON-STATIONARY ARC PROCESSES BY THE METHOD OF INTEGRATED CONVERSIONS

HASANOV Q.A.

In article one of the most widespread cases of failure - single-phase short circuit in 10-35 kV networks with isolated neutral is considered. The calculation algorithms based on discrete conversions and integrated equations are developed.