

О ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ШАХТНЫХ СЕТЯХ 660В С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ТОКОВ УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ

Чорноус Е.В., Журавель Е.А.
Донецкий национальный технический университет
pm@cld.dgtu.donetsk.ua

В даній роботі шляхом математичного моделювання дільничної мережі разом з пристроями захисту визначені параметри можливих перенапруг та інших резонансних явищ у динамічному стані.

При эксплуатации шахтных участков сетей напряжением 660В с изолированной нейтралью используются устройства контроля изоляции и защитного отключения (УАКИ, АЗАК, и др.), содержащие дроссель для компенсации емкостной составляющей тока утечки на землю. Наличие сравнительно большой индуктивности дросселя в одной цепи с емкостями кабелей, а также емкостями, образующими добавочную нулевую точку для подключения дросселя, представляют потенциальную опасность перенапряжений вследствие возможных резонансных явлений [1, 2]. В данной работе ставится задача – путем математического моделирования участковой сети совместно с основными звеньями устройства защиты оценить значения возможных перенапряжений и других резонансных явлений в динамическом режиме.

Эквивалентная схема участка шахтной сети с компенсацией емкостных токов утечки [1] приведена на рис.1. На схеме обозначено: 1, 2, 3 – фазы А, В, С источника питания; R_{II}, C – сопротивления изоляции и емкости кабелей по отношению к земле; L_D, R_D – индуктивность и активное сопротивление дросселя; C_O – емкости, образующие искусственную нулевую точку (точка 4) для подключения дросселя; I_{II}, R_{II} – ток и сопротивление в месте повреждения. Тот фактор, что в схеме рис.1 не учитываются сопротивления потребителей, обусловлен тем, что токи утечек представляют собой нулевую последовательность, на которую

исправные, не имеющие связи с землей потребители не оказывают существенного влияния.

В связи с тем, что напряжения двух групп емкостей C и C_0 взаимосвязаны, схема рис.1 содержит только три независимых накопителя энергии. Это значит, что для ее математического описания достаточно трех переменных состояния. В качестве переменных

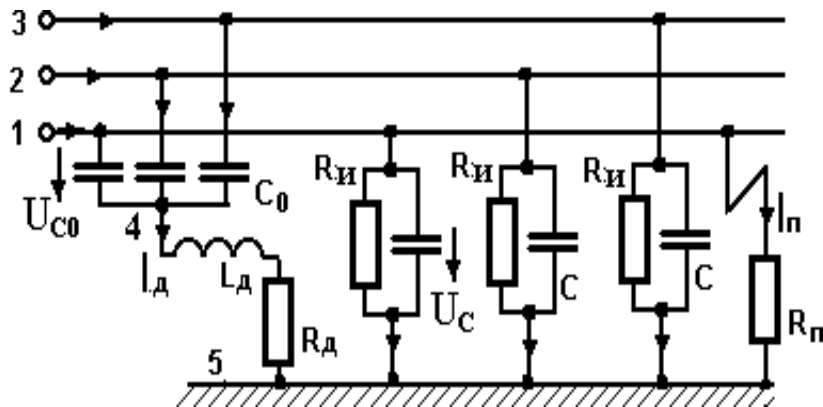


Рис.1. Эквивалентная схема замещения участковой сети напряжением 660В с изолированной нейтралью

состояния приняты ток дросселя I_d и напряжения на емкостях U_C, U_{C_0} . Исследование выполнялось для следующих значений параметров цепи: фазная эдс источника питания $E=380В$; емкость жилы кабеля по отношению к земле $C = 0,5...1мкФ$; емкость конденсаторов, образующих искусственную нулевую точку $C_0 = 2,5...10мкФ$; сопротивление изоляции кабеля по отношению к земле $R_{И} = 10^8 \text{ Ом}$; добротность дросселя на частоте сети $Q = 25$.

Схема рис.1 в динамике описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 -i_d / 3 + C_0 \cdot du_{C_0} / dt &= C_0 \cdot de / dt ; \\
 i_d / 3 + C \cdot du_C / dt + u_C (1/(3R_{И}) + 1/R_{н}) &= C \cdot de / dt + e / R_{И} ; \\
 L_d \cdot di_d / dt + R_d \cdot i_d - u_C + u_{C_0} &= 0 ,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где i_d, u_C, u_{C_0} – мгновенные значения переменных состояния (ток дросселя, напряжения на емкостях C и C_0 фазы А);

$e = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$ – мгновенное значение эдс фазы А источника питания;

ψ – начальная фаза, определяющая момент коммутации.

Кроме трех переменных состояния объектами наблюдения являлись мгновенные значения напряжения смещения нейтрали, напряжения неповрежденной фазы (фазы В), ток в месте повреждения $u_N, u_{\phi B}, i_{II}$:

$$u_N = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi) - u_C ;$$

$$u_{\phi B} = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi - 2\pi / 3) - u_N ; \quad (2)$$

$$i_{II} = u_C / R_{II} .$$

Решение системы (1) выполнялось обобщенным классическим методом [3], позволяющим снизить порядок линейной системы для расчета начальных условий и избежать объемной “ручной” работы, связанной с многократным дифференцированием уравнений (1).

На первом этапе ставилась задача исследования динамических свойств неповрежденной цепи рис.1. Особенности методики заключались в наблюдении переходного процесса в системе при ее резком внешнем возмущении. В качестве последнего имитировался мгновенный разряд емкости С фазы А в момент перехода ее напряжения через максимум ($\psi = \pi/2$)¹. Рассмотрим корни характеристического уравнения для условия $R_{II} = R_{II} = 10^8$ Ом : $p_{1,2} = - 6,289 \pm j \cdot 329,433$ 1/с; $p_3 = - 1,212 \cdot 10^{-3}$ 1/с. Из вида корней характеристического уравнения для неповрежденной сети следует, что частота свободных колебаний близка к частоте сети (52,4 Гц) при их практической длительности около 0,7...0,8 с (десятки периодов). Экспоненциальная составляющая затухает около 10 минут. Становится очевидным, что исследование динамики цепи рис.1 просто необходимо для выявления ее скрытых динамических свойств.

Анализ этих результатов показывает: амплитуда напряжения невозмущенной фазы не превышает амплитуды линейного напряжения (930 В); в составе фазных напряжений и тока дросселя длительное время (десятки секунд) сохраняется незначительная (2...4 %) экспоненциальная составляющая, которая ввиду медленного затухания более сходна с постоянной составляющей; напряжение

¹ Такое возмущение аналогично воздействию δ - функции (единичного импульса), часто используемой для исследования динамических систем [3,6]. На практике подобная ситуация возможна при возникновении кратковременной несимметрии.

коммутируемой фазы начинается с нулевого значения, что объясняется условиями принятого возмущения (мгновенный разряд емкости C фазы A); ток дросселя также начинается с нулевого значения, однако объясняется это тем, что в неповрежденной симметричной цепи этот ток до возмущения вообще отсутствует; первое амплитудное значение тока дросселя достигает $0,5A$, что соизмеримо с аварийным значением этого тока при замыкании фазы на землю и затухает (стремится к нулю) на протяжении десятков

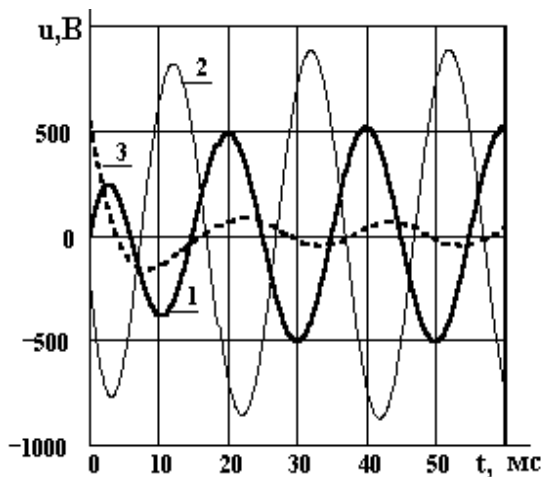


Рис.2. Зависимости напряжения U_N (1), неповрежденной (2) и поврежденной (3) фазы при ее замыкании на землю ($R_{II} = 1000 \text{ Ом}$).

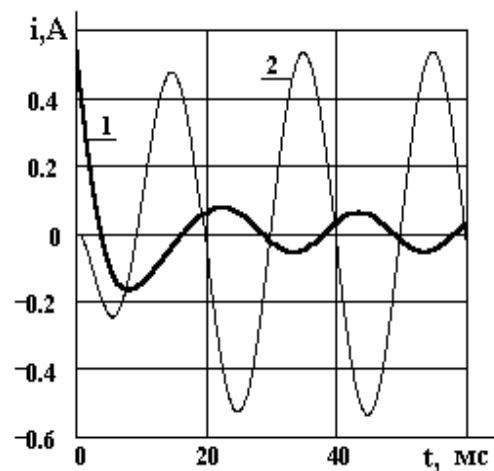


Рис.3. Зависимости тока в месте повреждения (1) и тока дросселя (2) при замыкании фазы на землю ($R_{II} = 1000 \text{ Ом}$).

периодов; в интервале времени $0,2 \dots 0,6$ с после возмущения в составе фазных напряжений наблюдается незначительные «биения» основной частоты, вследствие близости к ней частоты свободных колебаний, даже при достаточно резком возмущении, которое имитировалось в данном опыте, перенапряжения не обнаружены.

Таким образом, в поставленном вычислительном эксперименте неповрежденной сети не выявлены перенапряжения, однако в составе напряжений и, в особенности в составе тока дросселя выявлено наличие медленно затухающих динамических составляющих, с которыми необходимо считаться из-за возможного их влияния на работу цепи защиты от утечек.

Можно возразить, что ситуация, подобная смоделированной, является искусственной и в исправной сети маловероятна. Это не так. Исследуемая цепь, как всякая колебательная система, будет аналогичным образом реагировать на любое возмущение, связанное с

кратковременной несимметрией фазных напряжений нагрузки. Например, неодновременное прерывание тока при размыкании контактов пускателя является таким возмущением. а втором этапе исследовался динамический процесс, происходящий в цепи рис.1 при ее повреждении ($R_{II} = 1000 \text{ Ом}$), что эквивалентно попаданию человека под фазное напряжение. Корни характеристического уравнения для этого условия:

$$p_{1,2} = -156,9 \pm j \cdot 279,4 \text{ 1/с}; \quad p_3 = -32,035 \text{ 1/с}.$$

Из вида корней следует, что частота свободных колебаний по сравнению с предыдущим экспериментом несколько снизилась и составляет 44,5 Гц при их практической длительности около 0,1 с, а постоянная времени экспоненциальной составляющей равна 0,03 с. По сравнению с предыдущим опытом длительность переходного процесса уменьшилась в десятки раз (для экспоненциальной составляющей – на три порядка).

Основные результаты моделирования на втором этапе показаны на рис.2 и рис.3. Эти результаты полностью согласуются с результатами исследования установившегося режима за исключением первых 5...10мс, когда еще влияют динамические составляющие. Эта особенность относится также и к току в месте повреждения (току через тело человека). Первый его бросок может в зависимости от фазы коммутации (от начального заряда емкостей C) достигнуть 400мА, однако уже через 5...10мс приходит к установившемуся значению (30...40мА).

Отметим, что последний эксперимент повторялся несколько раз для различных моментов коммутации (менялась начальная фаза эдс источника питания). Различие в исследуемых величинах проявлялось только в начальных значениях. Во всех случаях перенапряжения или другие опасные резонансные явления не выявлены, а динамические составляющие достаточно быстро (8..10 мс) затухают.

Выполненные исследования системы в динамике дают ответ о ее динамических свойствах по сути только для двух точек пространства параметров $R_{II} - C_0$. Нереально повторить подобные исследования для всего указанного пространства. Однако, учитывая, что корни характеристического уравнения несут значительную информацию о динамических свойствах цепи, представляется целесообразным проследить их поведение при изменении R_{II} (корневые годографы). Такой анализ для условия $C_0 = 8 \text{ мкФ}$ был проведен. По мере уменьшения R_{II} выявились три характерных области, где свойства исследуемой цепи плавно меняются от медленно затухающих

колебаний (исправная цепь), до области с действительными корнями и далее снова к колебаниям, но уже другой частоты.

Попытаемся дать физическую интерпретацию полученных динамических свойств. Схему рис.1 по отношению к свободным составляющим переходных процессов можно представить как последовательный замкнутый контур, образованный дросселем, утроенной емкостью C_0 и утроенной емкостью C , шунтированной сопротивлением повреждения R_{II} .² Для неповрежденной сети частота ее свободных колебаний определяется в основном емкостью C и индуктивностью дросселя, а затухание – добротностью последнего. С уменьшением R_{II} емкость C частично шунтируется активным сопротивлением, что равносильно снижению добротности контура. Процесс становится аperiodическим (второй интервал). Дальнейшее уменьшение R_{II} “выключает” действие емкости C , что приводит к повышению эквивалентной емкости контура до значения $3 \cdot C_0$, и одновременно увеличивает эквивалентную добротность контура. Следствием этого имеем резкое уменьшение частоты свободных колебаний на третьем интервале и уменьшение интенсивности их затухания при $R_{II} \rightarrow 0$.

Выводы:

1. Для всех исследованных аварийных ситуаций цепи рис.1, как в установившемся, так и в переходном режиме напряжения фаз относительно «земли» не превышают значения линейного напряжения.

2. При возмущениях неповрежденной сети, в ней возникают медленно затухающие свободные колебания, практическая длительность которых составляет 0,7...0,8 с. Эти колебания слабо проявляют себя в составе напряжений фаз, вызывая незначительные «биения» на основной частоте, однако резко проявляются в составе тока дросселя и могут создать помехи в работе оперативной цепи защиты от утечек.

3. При замыкании фазы на землю через сопротивление $R_{II} = 1000$ Ом свободные составляющие затухают в течение 0,01...0,015 с, однако первый бросок тока в месте повреждения может достигать 0,4 А с постоянной времени затухания ≈ 3 мс.

4. Анализ корневых годографов показал, что исследованная цепь, как в исправном состоянии, так и при $R_{II} \rightarrow 0$ характеризуется медленно затухающими свободными колебаниями, причем, в

² Такое представление является несколько упрощенным, однако весьма наглядным.

последнем случае их частота составляет около 18 Гц, а время затухания около 0,4с.

Литература

1. Цапенко Е. Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях при компенсации токов утечки на землю. Промышленная энергетика. 1998, № 10. С.32-35.
2. Дзюбан В. С., Вареник Е, А. Резонансные перенапряжения в шахтных электрических сетях.//Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, 2002. с. 122-129.
3. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. “Вища школа”, К. – 1992. 475с.
4. Лейбов Р.М., Озерной М.И. Электрификация подземных горных работ. «Недра», М. – 1972. 489с.
5. Цапенко Е. Ф., Мирский М. И., Сухарев О. К. Горная электротехника./Под ред. Цапенко Е. Ф.: Учебник для техникумов. – М.: Недра, 1986. 437с.
6. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. «Наука», М. – 1967. 237с.

Поступила в редакцию 11 января 2004 года