ISSN 0002-306X Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2007. Т. LX. № 1.

УДК 621.311.014

С.А. ШАХБАЗЯН, Г.М. ХОСТИКЯН, П.С. МАНУКЯН, А.М. АРУТЮНЯН

РАСЧЕТ ДВУКРАТНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЦЕПЯХ С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СВЯЗЬЮ

Предлагается способ расчета одновременных несимметричных к.з. до и после трансформатора в электрических сетях с изолированной нейтралью. Задача решается методом наложения с использованием граничных условий в месте несимметрии собственно аварийной схемы. Получены значения несимметричных составляющих токов и напряжений с учетом сопротивления нагрузки. Результаты рекомендуется использовать для оценки чувствительности релейной защиты линий.

Ключевые слова: метод наложения, чувствительность алгоритма, короткозамыкатель, граничные условия, ЭДС.

Для оценки чувствительности релейной защиты питающей линии упрощенных подстанций требуется вычисление токов при разных случаях к.з. на стороне низшего напряжения трансформаторов при одновременном искусственном к.з., обусловленном срабатыванием короткозамыкателей.

Задача расчета в этом режиме сводится к расчету двойного несимметричного к.з. при наличии трансформаторной связи.

В статье этот вопрос рассматривается применительно к трансформаторам с соединением обмоток $\curlyvee$ /▷ - II, подключенным к линиям 35 *кВ* в сетях с малым током замыкания на землю, при установке двухполюсных короткозамыкателей. Для расчета используются предложенные в [1,2] способ и алгоритм расчета с применением граничных условий, учитывающих наличие трансформаторной связи между рассматриваемыми точками к.з. Расчет выполняется с учетом влияния нагрузки подстанции.

Исходная схема замещения приведена на рис. 1. Здесь $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ – фазные эквивалентные ЭДС источников питания; Z_C и $Z_{НГ}$ – соответственно суммарные сопротивления сети и нагрузки.

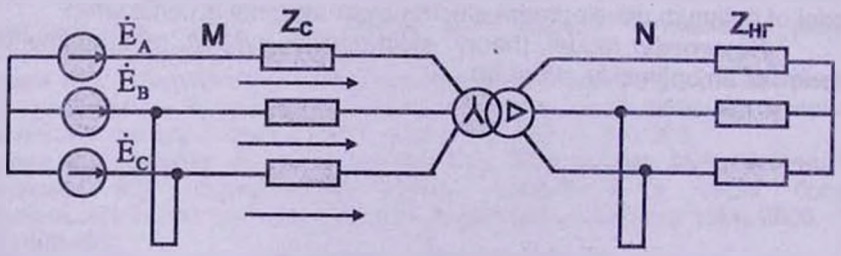


Рис.1. Схема сети при к.з. на низкой стороне трансформатора (точка N) с искусственным к.з. на стороне высокого напряжения (точка M)

Схема собственно-аварийного режима (приведенная к стороне звезды) и схемы замещения прямой и обратной последовательностей приведены на рис. 2-4.

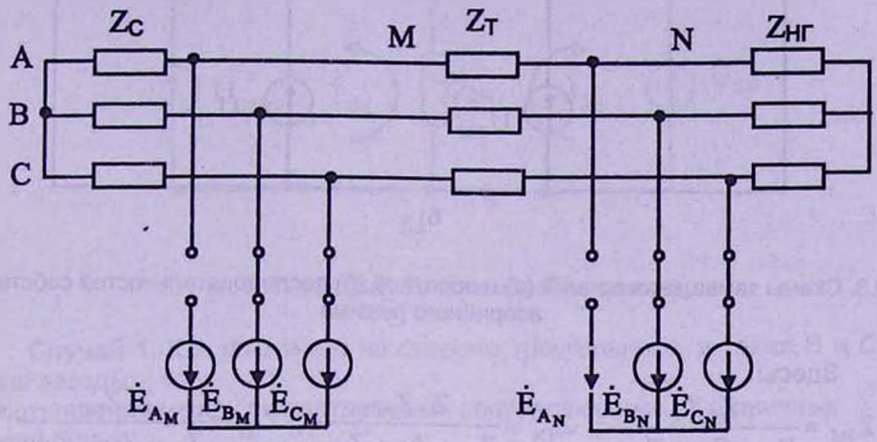
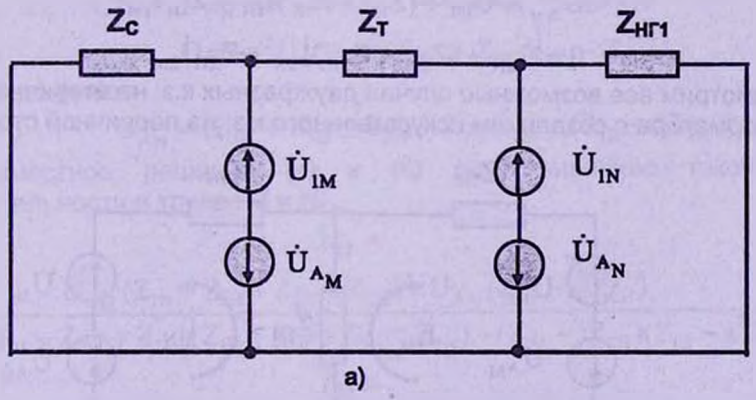
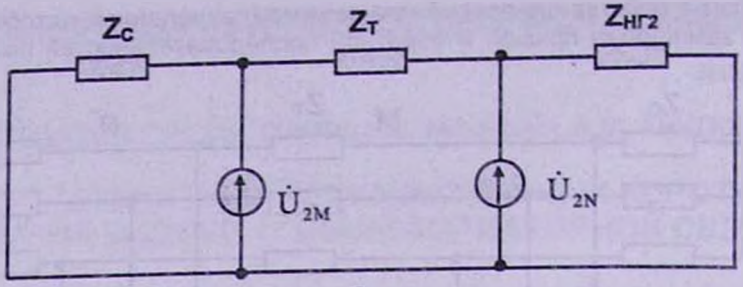


Рис.2. Собственно аварийная схема при двухфазном к.з. в точке N с искусственным к.з. в точке M

В расчетах принимается равенство сопротивлений прямой и обратной последовательностей для системы и трансформатора, т.е. $Z_{C1} = Z_{C2} = Z_C$, $Z_{T1} = Z_{T2} = Z_T$. Сопротивления Z_T и $Z_{НГ}$, а также напряжение $\dot{U}_{A_N}$ приведены к стороне высокого напряжения трансформаторов.

На рис. 3 приведены схемы прямой (а) и обратной (б) последовательностей до преобразования, а на рис. 4 а, б – то же, после преобразования.





б)

Рис.3. Схемы замещения прямой (а) и обратной (б) последовательностей собственно аварийного режима

Здесь:

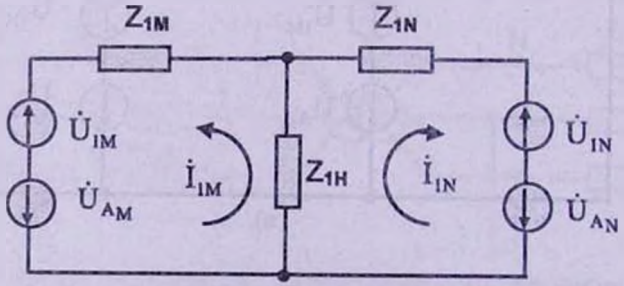
$$Z_{1M}=\frac{Z_C Z_T}{Z_C+Z_T+Z_{НГ1}};\quad Z_{1N}=\frac{Z_T Z_{НГ1}}{Z_C+Z_T+Z_{НГ1}};\quad Z_{1H}=\frac{Z_C Z_{НГ1}}{Z_C+Z_T+Z_{НГ1}};$$
$$Z_{2M}=\frac{Z_C Z_T}{Z_C+Z_T+Z_{НГ2}};\quad Z_{2N}=\frac{Z_T Z_{НГ2}}{Z_C+Z_T+Z_{НГ2}};\quad Z_{2H}=\frac{Z_C Z_{НГ2}}{Z_C+Z_T+Z_{НГ2}}. \qquad (1)$$

Точка N – место к.з. за трансформатором, а точка M – место к.з., созданного короткозамыкателем; $\dot{U}_{A_N}$ и $\dot{U}_{A_M}$ – фазные напряжения нормального доаварийного режима в точках N и M (для фазы A).

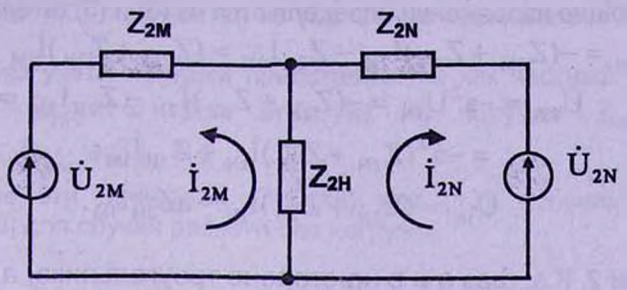
Согласно схемам рис. 4, записываем контурные уравнения для напряжений отдельных последовательностей:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{A_M} &= \dot{U}_{1M}+(Z_{1M}+Z_{1N})\dot{I}_{1M}+Z_{1H}\dot{I}_{1N};\\
0 &= \dot{U}_{2M}+(Z_{2M}+Z_{2N})\dot{I}_{2M}+Z_{2H}\dot{I}_{2N};\\
\dot{U}_{A_N} &= \dot{U}_{1N}+(Z_{1N}+Z_{1H})\dot{I}_{1N}+Z_{1H}\dot{I}_{1M};\\
0 &= \dot{U}_{2N}+(Z_{2N}+Z_{2H})\dot{I}_{2N}+Z_{2H}\dot{I}_{2M}.
\end{aligned} \qquad (2)$$

Рассмотрим все возможные случаи двухфазных к.з. на вторичной стороне трансформатора с созданием искусственного к.з. на первичной стороне.



а)



б)

Рис.4. Схемы рис. 3 после преобразования

Случай 1. К.з. фаз b и c на стороне треугольника, а также B и C - на стороне звезды.

Соотношения между симметричными составляющими из граничных условий будут:

для точки M – $\dot{I}_{2M} = -\dot{I}_{1M}$, $\dot{U}_{2M} = \dot{U}_{1M}$;

для точки N – $\dot{I}_{2N} = a^2\dot{I}_{1N}$, $\dot{U}_{2N} = -a^2\dot{U}_{1N}$.

С учетом приведенных соотношений первые два уравнения системы (2) записываются в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A_M} &= \dot{U}_{1M} + (Z_{1M} + Z_{1H})\dot{I}_{1M} + Z_{1H}\dot{I}_{1N}; \\ 0 &= \dot{U}_{1M} - (Z_{2M} + Z_{2H})\dot{I}_{1M} + a^2 Z_{2H}\dot{I}_{1N}. \end{aligned} \tag{3}$$

Откуда имеем

$$U_{A_M} = (Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})I_{1M} + (Z_{1H} - a^2 Z_{2H})\dot{I}_{1N}. \tag{4}$$

Аналогично из 3-го и 4-го уравнений системы (2) получаем

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A_N} &= \dot{U}_{1N} + (Z_{1N} + Z_{1H})\dot{I}_{1N} + Z_{1H}\dot{I}_{1M}; \\ 0 &= -a^2\dot{U}_{1N} + a^2(Z_{2N} + Z_{2H})\dot{I}_{1N} - Z_{2H}\dot{I}_{1M}. \end{aligned} \tag{5}$$

Откуда имеем

$$\dot{U}_{A_N} = (Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H})\dot{I}_{1N} + (Z_{1H} - aZ_{2H})\dot{I}_{1M}. \tag{6}$$

Совместное решение (4) и (6) дает значение токов прямой последовательности в точках M и N:

$$\dot{I}_{1M} = \frac{\dot{U}_{A_M}(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - \dot{U}_{A_N}(Z_{1H} - a^2 Z_{2H})}{(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - (Z_{1H} - aZ_{2H})(Z_{1H} - a^2 Z_{2H})};$$

$$\dot{I}_{1N} = \frac{\dot{U}_{A_N}(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H}) - \dot{U}_{A_M}(Z_{1H} - aZ_{2H})}{(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - (Z_{1H} - aZ_{2H})(Z_{1H} - a^2 Z_{2H})}. \tag{7}$$

Составляющие напряжений определяются из (3) и (5) (вторых уравнений):

$$\dot{U}_{2M} = \dot{U}_{1M} = -(Z_{2M} + Z_{2H})\dot{I}_{2M} - Z_{2H}\dot{I}_{2N} = (Z_{2M} + Z_{2H})\dot{I}_{1M} - a^2 Z_{2H}\dot{I}_{1N}; \quad (8)$$

$$\dot{U}_{2N} = -a^2\dot{U}_{1N} = -(Z_{2N} + Z_{2H})\dot{I}_{2N} - Z_{2H}\dot{I}_{2M} =$$

$$= -a^2(Z_{2N} + Z_{2H})\dot{I}_{1N} + Z_{2H}\dot{I}_{1M}; \quad (9)$$

$$\dot{U}_{1N} = (Z_{2N} + Z_{2H})\dot{I}_{1N} - aZ_{2H}\dot{I}_{1M}.$$

Случай 2. К.з. фаз a и b на стороне треугольника, а также B и C на стороне звезды.

Из граничных условий для точки N имеем $\dot{I}_{2N} = a\dot{I}_{1N}$ и $\dot{U}_{2N} = -a\dot{U}_{1N}$.

Из 3-го и 4-го уравнений системы (2) с учетом граничных условий получим

$$\dot{U}_{AN} = (Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H})\dot{I}_{1N} + (Z_{1H} - a^2 Z_{2H})\dot{I}_{1M}. \quad (10)$$

Аналогично из 1-го и 2-го уравнений системы (2) имеем

$$\dot{U}_{AM} = (Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})\dot{I}_{1M} + (Z_{1H} - aZ_{2H})\dot{I}_{1N}. \quad (11)$$

Решение (10) и (11) дает

$$\dot{I}_{1M} =$$

$$= \frac{\dot{U}_{AM}(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - \dot{U}_{AN}(Z_{1H} - aZ_{2H})}{(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - (Z_{1H} - a^2 Z_{2H})(Z_{1H} - aZ_{2H})};$$

$$\dot{I}_{1N} = \quad (12)$$

$$= \frac{\dot{U}_{AN}(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H}) - \dot{U}_{AM}(Z_{1H} - a^2 Z_{2H})}{(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - (Z_{1H} - a^2 Z_{2H})(Z_{1H} - aZ_{2H})}.$$

Выражения (12) получаются из (7), если в последнем операторы a и a^2 заменить соответственно на a^2 и a.

Случай 3. К.з. фаз c и a на стороне треугольника, а также фаз B и C на стороне звезды.

Из граничных условий для точки N имеем $\dot{I}_{2N} = I_{1N}$ и $\dot{U}_{2N} = -U_{1N}$.

Исходя из системы (2), с учетом граничных условий получим

$$\dot{I}_{1M} =$$

$$= \frac{\dot{U}_{AM}(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - \dot{U}_{AN}(Z_{1H} - Z_{2H})}{(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - (Z_{1H} - Z_{2H})^2};$$

$$\dot{I}_{1N} = \quad (13)$$

$$= \frac{\dot{U}_{AN}(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H}) - \dot{U}_{AM}(Z_{1H} - Z_{2H})}{(Z_{1M} + Z_{1H} + Z_{2M} + Z_{2H})(Z_{1N} + Z_{1H} + Z_{2N} + Z_{2H}) - (Z_{1H} - Z_{2H})^2}.$$

Выражения (13) получаются из (7), если в последнем a и a^2 заменить на 1.

Расчет без учета нагрузки представляется как частный случай, если положить $Z_{НГ1} = Z_{НГ2} = \infty$. При этом из (1) получим $Z_{1M} = Z_{2M} = 0$, $Z_{1N} = Z_{2N} = Z_T$, $\dot{U}_{AM} = \dot{U}_{AN} = E_A$.

Подставив эти данные в (7), (12) или (13), получим выражения, приведенные в [3] для случая расчета без нагрузки.

Выводы.

Для оценки чувствительности релейной защиты линий, питающих упрощенные подстанции с короткозамыкателями, целесообразно при расчете несимметричных к.з. учитывать нагрузку, включенную к шинам низшего напряжения подстанции.

Описанная в статье методика расчета несимметричных к.з. с обеих сторон трансформатора и приведенные симметричные составляющие токов и напряжений позволяют получить уточненные выражения токов к.з. и напряжений с учетом нагрузки.

Данные в [3] выражения тех же величин, полученные без учета нагрузки, являются частным случаем приведенных в статье выражений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сааков В.И., Шахбазян С.А.** К применению метода наложения в расчетах коротких замыканий // Межвуз. сб. Энергетика. Вып. 3 / ЕрПИ. – Ереван, 1979.
2. **Сааков В.И., Шахбазян С.А.** Алгоритм расчета двойных несимметричных к.з. в системах электроснабжения // Межвуз. сб. Энергетика / ЕрПИ, Ереван, 1985.
3. **Авербух А.М.** Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий.- Л.:Энергия, 1979. - 182 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 14.03.2007.

Ս.Հ. ՇԱՀԲԱԶՅԱՆ, Գ.Մ. ԽՈՍՏԻԿՅԱՆ, Պ.Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ,
Ա.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԱՅԻՆ ԿԱՊՈՎ ՇՂԹԱՆԵՐՈՒՄ ԵՐԿՊԱՏԻԿԱՅԻՆ ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ԿԱՐՃ ՄԻԱՑՄԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ

Տրվում է մեկուսացված չեզոքով էլեկտրական ցանցերում տրանսֆորմատորից առաջ և հետո միաժամանակ ոչ սիմետրիկ կարճ միացման հաշվարկի ձևը: Խնդիրը լուծվում է վերադրման մեթոդով՝ կիրառելով սահմանային պայմանները հատկապես վթարային սխեմայի ոչ սիմետրիկության տեղում: Ստացվել են հոսանքի և լարման ոչ սիմետրիկ բաղադրիչների մեծությունները՝ հաշվի առնելով բեռի դիմադրությունը: Արդյունքները խորհուրդ է տրվում կիրառել գծի ռելեական պաշտպանության զգայունության գնահատման համար:

Առանցքային բառեր. վերադրման մեթոդ, ալգորիթմի զգայունություն, կարճ միացում, սահմանային պայմաններ, էլՇՈւ:

S.H. SHAKHBAZYAN, G.M. KHOSTIKYAN, P.S. MANUKYAN,
A.M. HAROUTYUNYAN

NONSYMMETRIC SHORT CIRCUIT ACCOUNTING BY TRANSFORMER TIE IN CHAINS

A method of nonsymetric short circuit design before and after the transformer in electric circuits with insulated neutral is proposed. The problem is solved by the superimposition method using boundary condition especially in non-symmetry placed in emergency scheme. Electricity and voltage nonsymmetric components value taking into consideration load flow resistance are obtained. The results are advised to be used for estimation of line relay protection sensitivity.

Keywords: superimposition method, sensitivity of algorithm, short circuiter, boundary condition, e.m.f.