

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 6-10 КВ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ

**Живых Денис Александрович**

ДонНТУ

[den106@ukr.net](mailto:den106@ukr.net)

## **Abstract**

*Zhivyykh D. On the data of experience of operation the most widespread kind of damage in these networks are the single-phase short circuits on ground, components up to 90% from (common number of infringements of normal work of a network. Therefore in conditions of a constantly worsening technical condition of networks on the foreground the problem of maintenance on a high level reliability of electrosupply of the consumers is put forward at the expense of prolongation of service life of an electric equipment with the worn out isolation.*

*The basic results of work:*

- 1) The mathematical model of a typical network with isolated neutral is modified.*
- 2) The mathematical model of transients on the computer is investigated and the analysis of the received results is made.*
- 3) The ways of restriction overvoltage are developed.*

В условиях постоянно ухудшающегося технического состояния сетей на передний план выдвигается проблема поддержания на достаточно необходимом уровне надежность электроснабжения потребителей за счет продления срока службы электрооборудования с изношенной изоляцией. По данным опыта эксплуатации самым распространенным видом повреждения в этих сетях являются однофазные замыкания на землю, составляющие до 90% от общего числа нарушений нормальной работы сети. Как показывают исследования в сложившейся ситуации наиболее эффективное решение указанной проблемы лежит в оптимизации и управлении режима нейтрали сети.

Широко применяемые в настоящее время дугогасящие катушки(ДГК) как средство защиты электрооборудования от последствий однофазных замыканий из-за

наличия несимметрии по фазам не только не улучшают работу сети, а наоборот, создают более неблагоприятные условия для работы изоляции электрооборудования. Перекосы напряжений по фазам резко сокращают срок службы изоляции всей электрически связанной сети и не обеспечивают требуемой эффективности в режиме дуговых замыканий фазы на землю т.к. росту кратности перенапряжения на элементах сети пропорционально степени несимметрии напряжения достигает величины  $3U_{\phi}$  и более. Из-за указанных причин аварийность в современных сетях достигает 120-140 повреждений в год на каждые 100 км линий, до 80% из которых развиваются в междуфазные короткие замыкания или многоместные пробой изоляции на поврежденной фазе.

В числе исследований многочисленных коммутационных перенапряжений, возникающих вследствие всякого рода замыканий и размыканий электрических цепей, наибольшее количество исследований было посвящено весьма распространённым перенапряжениям при дуговых замыканиях на землю в высоковольтных сетях, работающих с изолированной нейтралью.

Основоположником исследований этих перенапряжений был Петерсен, который в 1916 г. разработал теорию, объясняющую физическую сущность процесса возникновения максимальных перенапряжений.

В 1923 г. Петерс и Слепян предложили другую теорию, принципиально отличную от теории Петерсена.

Позднее эти теории дополнялись различными авторами на основании теоретических и лабораторных исследований в отношении уровней максимальных перенапряжений и формы их развития.

В 1957 г. Н.Н.Беляковым была опубликована теория возникновения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю также в сетях с изолированной нейтралью.

Процесс возникновения максимальных перенапряжений в соответствии с теорией Петерсена имеет следующие характерные особенности :

а) Повторные зажигания заземляющей дуги представляются в виде металлических замыканий. В связи с этим не учитывается наличие у дуги вольт-амперной зависимости, которая в действительности для токов высокой частоты имеет явно динамический характер, т.е. напряжение на дуге не имеет чётко выраженных пиков

гашения и зажигания, как это обычно принято считать для статической характеристики. Процесс деионизации запаздывает относительно изменения тока в дуге.

Повторные зажигания по Петерсену происходят регулярно через каждый полупериод при максимальном напряжении на повреждённой фазе, когда напряжение источника питания равно максимальному значению. Максимальные перенапряжения могут достигать величины  $7.5 U_{\phi}$ .

б) Длительность горения дуги при каждом повторном зажигании равна полупериоду свободных колебаний, несмотря на то, что величина тока и скорость его изменения с каждым полупериодом увеличивается, а также увеличивается его тепловое и ионизирующее действие.

в) После каждого гашения дуги в сети появляется нарастающее постоянное напряжение смещения  $U_{см}$ .

г) Восстановление напряжения на повреждённой фазе после гашения дуги имеет колебательный характер с высокочастотным пиком, превышающим величину фазного напряжения. Однако, предположено, что диэлектрическая прочность места повреждения нарастает быстрее, нежели восстанавливающееся напряжение.

д) При каждом полупериоде перенапряжения изменяют свой знак.

Характерными особенностями возникновения перенапряжений по теории Петерса и Слепяна являются :

а) Повторные зажигания представляются также в виде металлического замыкания на землю. Они происходят регулярно через каждый период при максимальном значении напряжения на повреждённой фазе ( при первом и всех последующих зажиганиях соответственно  $\pm U_{\phi}$  и  $\pm 2 U_{\phi}$  ).

б) Длительность горения дуги при каждом повторном зажигании равна полупериоду промышленной частоты.

в) Поскольку гашения дуги происходят при каждом прохождении тока промышленной частоты через нулевое значение, то пики гашения отсутствуют. Восстановление напряжения на повреждённой фазе после гашения дуги происходит плавно с промышленной частотой.

г) Одинаковые ( за исключением первого ) перенапряжения при каждом зажигании дуги образуются в результате неизменяющихся начальных и конечных напряжений на повреждённых фазах, соответственно  $\pm 0.5U_{\phi}$  и  $\pm 1.5U_{\phi}$ .

д) Перенапряжения знака не изменяют.

Для возникновения максимальных перенапряжений по Белякову необходимо совпадение двух основных условий в одном цикле, а именно:

а) Первое зажигание дуги должно произойти раньше максимума э.д.с. повреждённой фазы, чтобы к моменту гашения ( максимума напряжения на повреждённой фазе ) первый пик восстанавливающегося напряжения достигал величины  $0.4U_{\phi}$ .

б) Второе зажигание дуги, при котором на отстающей фазе возникают наибольшие перенапряжения  $3.2U_{\phi}$ , должно произойти именно в момент при напряжении повреждённой фазы, приблизительно равном  $2.2U_{\phi}$ , т.е. больше, чем первое зажигание.

Сети одного и того же номинального напряжения при разных способах заземления нейтрали имеют ряд различий в технических и экономических показателях. Способ заземления нейтрали в первую очередь влияет на величину тока замыкания на землю. Поэтому ПУЭ все электрические сети, в зависимости от величины тока, подразделяет на сети с малым и сети с большим током замыкания на землю. Согласно принятым в Украине нормам сети 6-10 кВ относятся к сетям с малым током замыкания на землю.

Для математического моделирования за основу взята сеть изображённая на рис.1, в которой для низкоомного заземления нейтрали используется специальный присоединительный трансформатор 10/0.4 кВ.

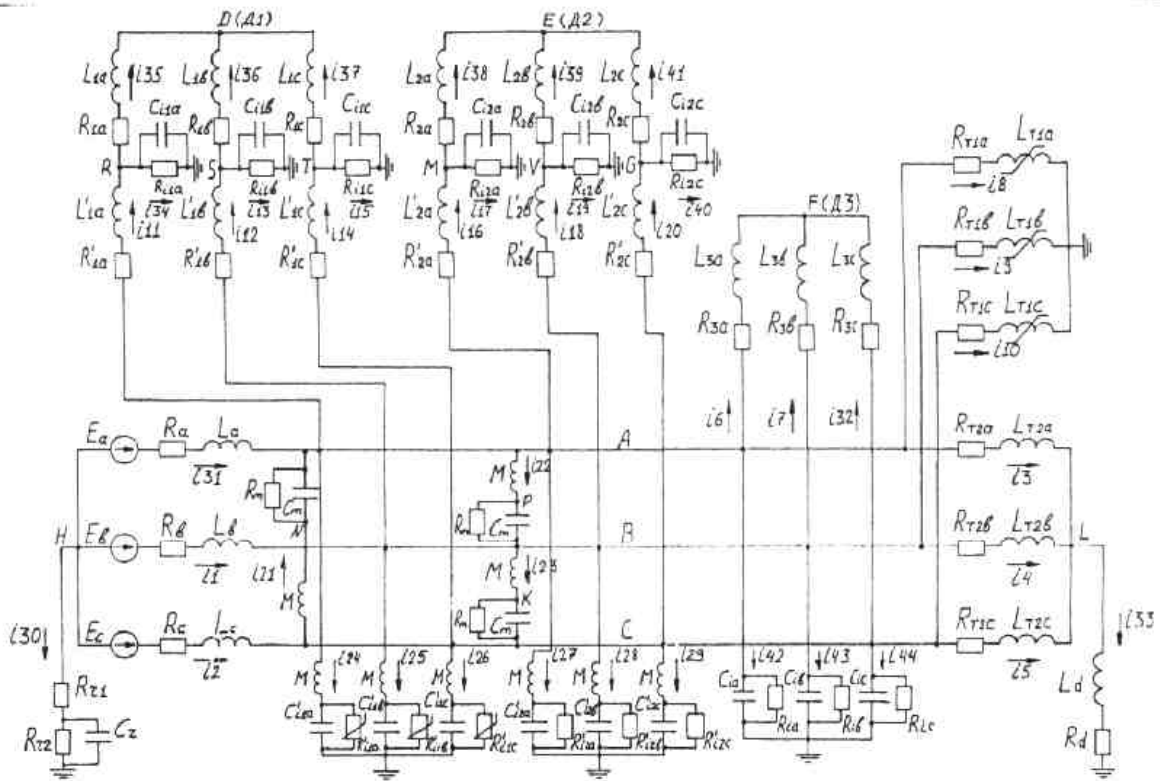


Рисунок 1-Схема замещения сети

На схеме замещения рабочий трансформатор, являющийся источником питания, представлен фазной индуктивностью рассеяния  $L$ , активным сопротивлением  $R$  и источником ЭДС  $E$ . Сеть отражена сосредоточенными фазной  $C_i$  и междуфазной  $C_m$  ёмкостями, активными сопротивлениями изоляции  $R_i$  и  $R_m$  и междуфазной индуктивностью  $M$ . Специальный присоединительный трансформатор введён в схему замещения фазными значениями индуктивности рассеяния  $L_{T2}$  и активного сопротивления  $R_{T2}$ . Трансформатор напряжения, введённый для учёта влияния феррорезонансных процессов в сети, представлен фазным значением активного сопротивления  $R_{T1}$  и нелинейной зависимостью его фазной индуктивности рассеяния  $L_{T1}$  от величины протекающего тока. Три высоковольтных асинхронных электродвигателя представлены в схеме замещения фазными сверхпереходными индуктивностями рассеяния  $L_1, L_2, L_3$  и активными сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3$ . Первый и второй электродвигатели подключаются к сети с помощью кабелей, представленных П-образной схемой замещения: индуктивности  $L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ ; активные сопротивления  $R_{\phi 1}, R_{\phi 2}$ ; активные сопротивления изоляции  $R_{i1}, R_{i2}, R_{\phi 2}$ ; ёмкостные утечки через изоляцию  $C_{i1}, C_{i2}, C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$ , причём в ёмкости  $C_{i1}, C_{i2}$  входит и ёмкость фазы каждого электродвигателя относительно земли. Оксидно-цинковые ограничители перенапряжений (ОПН), устанавливаемые на сборных шинах, учитываются

нелинейными зависимостями их активного сопротивления  $R_{\phi_{i1}}$  от напряжения. В нейтраль присоединительного трансформатора может подключаться дугогасящая катушка (  $L_d, R_d$  ) или токоограничивающий резистор  $R_d$ . В нейтраль рабочего трансформатора может подключаться токоограничивающий резистор (  $R_{r1}$  или  $R_{r2}$  ) или ёмкость  $C_r$  , включаемая как сама, так и вместе с токоограничивающим резистором ( последовательно или параллельно ). Замыкание фазы на землю имитируется активным сопротивлением дуги, включаемым вместо активного сопротивления изоляции в любом месте схемы замещения.

Используя построенный для схемы замещения граф цепи составляем следующую систему дифференциальных уравнений относительно неизвестных контурных токов :

$$R_b i_1 + L_b p i_1 + U_B - U_A + R_a (i_1 + i_2 + i_{30}) + L_a p (i_1 + i_2 + i_{30}) = e_b - e_a ; ( 2.1 )$$

$$R_c i_2 + L_c p i_2 + U_C - U_A + R_a (i_1 + i_2 + i_{30}) + L_a p (i_1 + i_2 + i_{30}) = e_c - e_a ; ( 2.2 )$$

$$R_{T2a} i_3 + L_{T2a} p i_3 + R_d (i_3 + i_4 + i_5) + L_d p (i_3 + i_4 + i_5) - U_A = 0 ( 2.3 )$$

$$R_{T2b} i_4 + L_{T2b} p i_4 + R_d (i_3 + i_4 + i_5) + L_d p (i_3 + i_4 + i_5) - U_B = 0 ; ( 2.4 )$$

$$R_{T2c} i_5 + L_{T2c} p i_5 + R_d (i_3 + i_4 + i_5) + L_d p (i_3 + i_4 + i_5) - U_C = 0 ; ( 2.5 )$$

$$R_{3a} i_6 + L_{3a} p i_6 + R_{3c} (i_6 + i_7) + L_{3c} p (i_6 + i_7) + U_C - U_A = 0 ; ( 2.6 )$$

$$R_{3b} i_7 + L_{3b} p i_7 + R_{3c} (i_6 + i_7) + L_{3c} p (i_6 + i_7) + U_C - U_B = 0 ; ( 2.7 )$$

$$R_{T1a} i_8 + L_{T1a} p i_8 - U_A = 0 ; ( 2.8 )$$

$$R_{T1b} i_9 + L_{T1b} p i_9 - U_B = 0 ; ( 2.9 )$$

$$R_{T1c} i_{10} + L_{T1c} p i_{10} - U_C = 0 ; ( 2.10 )$$

$$R_{\phi_{1a}} i_{11} + L_{\phi_{1a}} p i_{11} + U_R - U_A = 0 ; ( 2.11 )$$

$$R_{\phi_{1b}} i_{12} + L_{\phi_{1b}} p i_{12} + R_{1b} (i_{12} - i_{13}) + L_{1b} p (i_{12} - i_{13}) + R_{1a} (i_{12} - i_{13} + i_{14} - i_{15}) + L_{1a} p (i_{12} - i_{13} + i_{14} - i_{15}) + U_R - U_B = 0 ; ( 2.12 )$$

$$U_S - U_R + R_{1a} (i_{13} - i_{12} - i_{14} + i_{15}) + L_{1a} p (i_{13} - i_{12} - i_{14} + i_{15}) + R_{1b} (i_{13} - i_{12}) + L_{1b} p (i_{13} - i_{12}) = 0 ; ( 2.13 )$$

$$R_{\phi_{1c}} i_{14} + L_{\phi_{1c}} p i_{14} + R_{1c} (i_{14} - i_{15}) + L_{1c} p (i_{14} - i_{15}) + R_{1a} (i_{14} + i_{12} - i_{13} - i_{15}) + L_{1a} p (i_{14} + i_{12} - i_{13} - i_{15}) + U_R - U_C = 0 ; ( 2.14 )$$

$$U_T - U_R + R_{1a} (i_{15} - i_{12} + i_{13} - i_{14}) + L_{1a} p (i_{15} - i_{12} + i_{13} - i_{14}) + R_{1c} (i_{15} - i_{14}) + L_{1c} p (i_{15} - i_{14}) = 0 ; ( 2.15 )$$

$$R_{\phi_{2a}} i_{16} + L_{\phi_{2a}} p i_{16} + R_{2a} (i_{16} - i_{17}) + L_{2a} p (i_{16} - i_{17}) + R_{2c} (i_{16} - i_{17} + i_{18} - i_{19}) + L_{2c} p (i_{16} - i_{17} + i_{18} - i_{19}) + U_G - U_A = 0 ; ( 2.16 )$$

$$U_M - U_G + R_{2c} (i_{17} - i_{16} - i_{18} + i_{19}) + L_{2c} p (i_{17} - i_{16} - i_{18} + i_{19}) + R_{2a} (i_{17} - i_{16}) + L_{2a} p (i_{17} - i_{16}) = 0 ; ( 2.17 )$$

$$R_{\phi_{2b}} i_{18} + L_{\phi_{2b}} p i_{18} + R_{2b} (i_{18} - i_{19}) + L_{2b} p (i_{18} - i_{19}) + R_{2c} (i_{18} + i_{16} - i_{17} - i_{19}) +$$

$$+L_{2c}p(i_{18}+i_{16}-i_{17}-i_{19})+U_G-U_B=0 ; ( 2.18 )$$

$$U_V-U_G+R_{2c}(i_{19}-i_{16}+i_{17}-i_{18})+L_{2c}p(i_{19}-i_{16}+i_{17}-i_{18})+R_{2b}(i_{19}-i_{18})+L_{2b}p(i_{19}-i_{18})=0 ; ( 2.19 )$$

$$R\phi_{2c}i_{20}+L\phi_{2c}pi_{20}+U_G-U_C=0 ; ( 2.20 )$$

$$Mpi_{21}+U_{NA}+U_A-U_C=0 ; ( 2.21 )$$

$$Mpi_{22}+U_{PB}+U_B-U_A=0 ; ( 2.22 )$$

$$Mpi_{23}+U_{KC}+U_C-U_B=0 ; ( 2.23 )$$

$$U_{A1}-U_A+Mpi_{24}=0 ; ( 2.24 )$$

$$U_{B1}-U_B+Mpi_{25}=0 ; ( 2.25 )$$

$$U_{C1}-U_C+Mpi_{26}=0 ; ( 2.26 )$$

$$U_{A2}-U_A+Mpi_{27}=0 ; ( 2.27 )$$

$$U_{B2}-U_B+Mpi_{28}=0 ; ( 2.28 )$$

$$U_{C2}-U_C+Mpi_{29}=0 ; ( 2.29 )$$

$$R_{r1}i_{30}+U_X-U_A+R_a(i_{30}+i_1+i_2)+L_{ap}(i_{30}+i_1+i_2)=-e_a ; ( 2.30 )$$

, где  $p$  - оператор дифференцирования.

К уравнениям ( 2.1-2.30 ) добавляются ещё 19 дифференциальных уравнений, записанных относительно напряжений на ёмкостях по типу (2.31)

$$CpU_A = ( i - U_A/R_{iA} ) ; ( 2.31 )$$

На основе большого объема исследований, выполненных с использованием математических и физических моделей сети и отдельных опытах в реальных сетях, нами обнаружены принципиально новые явления, требующие нового подхода к выбору и расстановке средств защиты от дуговых перенапряжений.

При выборе режима нейтрали для каждой конкретной сети должны учитываться ее специфические особенности, в частности: ее параметры, состояние изоляции, категория потребителей, наличия средств защиты от замыканий на землю, требования к электробезопасности и т.д.

## **Литература**

1. Евдокунин Г. А., Гудилин С. В., Корепанов А. А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. Электричество, 1998, N 12
2. Брянцев А.М., Базылев Б.И., Бики М.А., Уколов С.В., Долгополов А.Г., Лурье А.И., Евдокунин Г.А., Славин Г.А. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы - новое электротехническое оборудование. Электротехника, N 7, 1999.