

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТОКОГРАНИЧИТЕЛЕЙ В НЕЙТРАЛЯХ СЕТЕЙ 6 – 35 КВ

*Манусов В.З. (Новосибирский государственный
технический университет, г. Новосибирск),
Михеев П.А. (ОАО «Сибирьэнерго», г. Новосибирск)*

Введение

Рассмотрены несколько схемных решений применения сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) в нейтральных 6-35 кВ. СОТ – устройства, использующие явление сверхпроводимости, обладающие способностью резко увеличивать своё сопротивление по отношению к внешней сети. СОТ могут иметь различное исполнение и обеспечивать токоограничение с помощью активного и индуктивного сопротивления.

Нормальные режимы работы сети

Для анализа процессов с применением СОТ резистивного типа (обладающего активным сопротивлением) в нейтрали электрической сети рассмотрим схему замещения, приведенную на рис. 1.

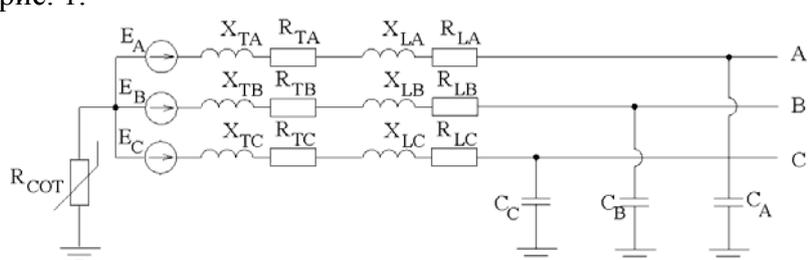


Рис. 1. Электрическая схема замещения включения СОТ резистивного типа в нейтраль электрической сети.

В нормальном режиме работы СОТ находится в сверхпроводящем состоянии, **при этом**, как следствие, смещение нейтрали минимально: оно будет определяться несимметрией параметров сети и сопротивлением СОТ.

Смещение нейтрали в зависимости от степени несимметрии **параметров** фаз линий и значения сопротивления в нейтрали представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость смещения нейтрали от **активного сопротивления **в** нейтрали и несимметрии емкостей сети.**

Сопротивление нейтрали, Ом	Смещение нейтрали, о.е. при несимметрии сети						
	0	10%	20%	30%	40%	50%	100%
0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	$4.549 \cdot 10^{-6}$	$9.098 \cdot 10^{-6}$	$1.365 \cdot 10^{-5}$	$1.820 \cdot 10^{-5}$	$2.274 \cdot 10^{-5}$	$4.549 \cdot 10^{-5}$
5	0	$1.137 \cdot 10^{-5}$	$2.274 \cdot 10^{-5}$	$3.412 \cdot 10^{-5}$	$4.549 \cdot 10^{-5}$	$5.686 \cdot 10^{-5}$	$1.137 \cdot 10^{-4}$
10	0	$2.275 \cdot 10^{-5}$	$4.549 \cdot 10^{-5}$	$6.823 \cdot 10^{-5}$	$9.068 \cdot 10^{-5}$	$1.137 \cdot 10^{-4}$	$2.274 \cdot 10^{-4}$
50	0	$1.137 \cdot 10^{-4}$	$2.274 \cdot 10^{-4}$	$3.412 \cdot 10^{-4}$	$4.549 \cdot 10^{-4}$	$5.686 \cdot 10^{-4}$	$1.137 \cdot 10^{-3}$
100	0	$2.274 \cdot 10^{-4}$	$4.549 \cdot 10^{-4}$	$6.823 \cdot 10^{-4}$	$9.097 \cdot 10^{-4}$	$1.137 \cdot 10^{-3}$	$2.274 \cdot 10^{-3}$
500	0	$1.136 \cdot 10^{-3}$	$2.273 \cdot 10^{-3}$	$3.409 \cdot 10^{-3}$	$4.546 \cdot 10^{-3}$	$5.683 \cdot 10^{-3}$	0.01137
1000	0	$2.267 \cdot 10^{-3}$	$4.535 \cdot 10^{-3}$	$6.804 \cdot 10^{-3}$	$9.074 \cdot 10^{-3}$	0.01134	0.02271
5000	0	0.01054	0.02119	0.03437	0.04277	0.0537	0.1095
∞	0	0.028	0.0583	0.0907	0.1256	0.1633	0.4082

Согласно п. 2.8.16 ПТЭЭП [1] «при отсутствии в сети замыкания на землю напряжение смещения нейтрали допускается не выше 15 % фазного напряжения длительно и не выше 30 % в течение 1 часа».

Таким образом, в нормальном режиме работы применение СОТ в нейтрали сети не имеет явных преимуществ по сравнению с резистивным заземлением нейтрали, но явно имеет преимущество по сравнению с вариантом изолированной нейтрали.

Режимы сети при различной несимметрии емкостей фаз линии при резонансном заземлении нейтрали с помощью ДГР представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Зависимость смещения нейтрали от несимметрии емкостей сети при дугогасящем реакторе (ДГР) в нейтрали.

Несимметрия емкостей линии	Смещение нейтрали, о.е.
0	0
1 %	0.0815
2 %	0.1602
3 %	0.2382
4 %	0.3094
5 %	0.3741
6 %	0.4318
7 %	0.4824
8 %	0.5263
9 %	0.5641
10 %	0.5966

Из таблицы 2 видно, что даже при незначительных несимметриях емкостей линии составляющих несколько процентов, наблюдается значительное смещение нейтрали.

Согласно п. 2.8.16 ПТЭЭП [1] «в сетях, работающих с компенсацией емкостного тока, напряжение несимметрии должно быть не выше 0.75 % фазного напряжения».

Рассмотрим вариант включения СОТ резистивного типа параллельно ДГР в нейтраль электрической сети (рис. 2).

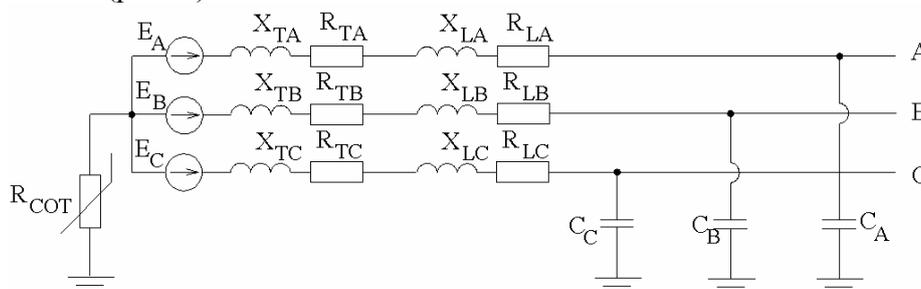


Рис. 2. Электрическая схема замещения включения СОТ резистивного типа параллельно ДГР в нейтраль электрической сети.

Также рассмотрим вариант включения СОТ индуктивного типа в нейтраль электрической сети [2], изображенный на рис. 3.

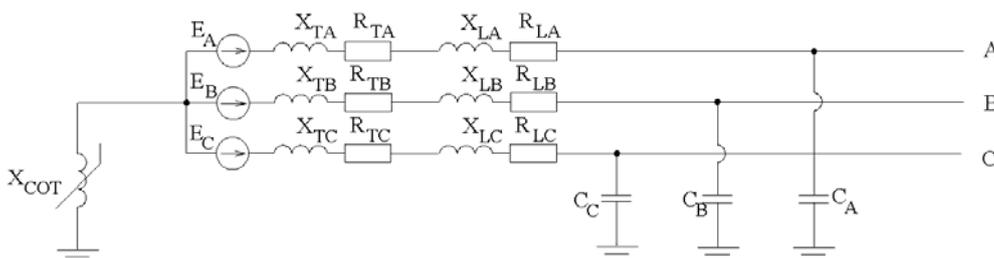


Рис. 3. Электрическая схема замещения включения СОТ индуктивного типа в нейтраль электрической сети.

Таким образом, при включении СОТ резистивного типа параллельно ДГР, а также включения СОТ индуктивного типа в нейтраль электрической сети в силу малого значения сопротивления СОТ в нормальном режиме работы сети будет наблюдаться **существенное** снижение смещения нейтрали при значительных несимметриях **фазных** емкостей линий.

Аварийные режимы работы сети

Все аварийные режимы рассматриваются при допущении симметрии фазных параметров сети.

Рассмотрим режим **ОЗНЗ** при установке **СОТ** резистивного типа в нейтраль электрической сети (рис. 4).

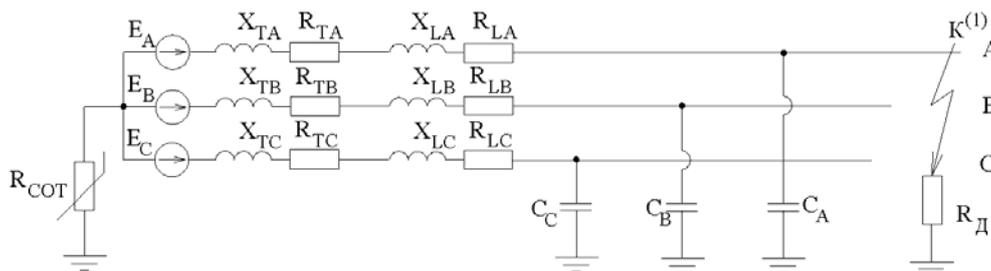


Рис. 4. Схема замещения для расчёта ОЗНЗ в сети с СОТ резистивного типа в нейтрали

Принципиально важным моментом является допущение о возможности многократного срабатывания СОТ при перемежающихся дуговых замыканиях.

Целесообразно применять СОТ активного типа в нейтрали электрической сети, когда нет возможности уменьшать постоянное активное высокоомное сопротивление нейтрали, добиваясь отсутствия эскалации напряжений при перемежающемся дуговом замыкании, по причине одновременного увеличения тока ОЗНЗ.

$$R_N \leq \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_\phi} \quad (1)$$

Это будет наблюдаться при протяжённых линиях с емкостными токами замыкания близкими к предельно допустимым согласно п. 1.2.16 ПУЭ [3].

Обозначим допустимую ёмкость $C_{доп}$ создающую предельно допустимый емкостной ток замыкания:

$$I_{доп} = 3 \cdot U_\phi \cdot \omega \cdot C_{доп} \quad (2)$$

При ОЗНЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали ток замыкания будет определяться:

$$I_{доп} = \frac{3 \cdot U_\phi}{(jX_C // 3R_N)} \quad (3)$$

Учитывая условие отсутствия эскалации напряжений, получаем:

$$I_{доп} = \frac{3 \cdot U_\phi}{(jX_C // X_C)} = \frac{3 \cdot U_\phi}{(jX_C \cdot X_C) / (jX_C + X_C)} \quad (4)$$

Найдём модуль тока ОЗНЗ:

$$|I_{доп}| = \frac{3 \cdot U_\phi}{X_C^2 / \sqrt{(X_C^2 + X_C^2)}} = \frac{3 \cdot U_\phi}{X_C^2 / \sqrt{(X_C^2 + X_C^2)}} = \frac{3 \cdot U_\phi}{X_C \cdot \sqrt{2}} \quad (5)$$

Таким образом, применение СОТ целесообразно в диапазоне:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot C_{\text{доп}} \div C_{\text{доп}} \right) \text{ или } \left(0.71 \cdot C_{\text{доп}} \div C_{\text{доп}} \right).$$

Это можно интерпретировать как применение в системах с протяжёнными линиями, при длинах свыше 71 % от предельной протяжённости.

Рассмотрим данный режим в случаях изолированной нейтрали электрической сети, а также нейтрали с включением СОТ активного типа.

С учётом требований п. 1.7.97 ПУЭ [3] к сопротивлению заземляющих устройств, используемых одновременно для электроустановок до и выше 1000 В, пусть в сверхпроводящем состоянии СОТ имеет сопротивление 4 Ома, а в проводящем - 750 Ом, **причем** постоянная времени реагирования составляет 10 мс.

В большинстве реальных случаев имеют место перемежающиеся дуговые замыкания, где на напряжение промышленной частоты накладывается высокочастотная составляющая, с *эскалацией напряжений* при последующих пробоях [4], вследствие чего напряжения на неповреждённых фазах могут *многократно* превысить полученные выше значения.

Режимом сети будет являться дуговое замыкание (сопротивление дуги $R_d = 1$ Ом), замыкание в фазы А происходит в момент $t = 0.05$ сек, в момент времени $t = 0.1$ сек замыкание устраняется, в момент времени $t = 0.188$ сек происходит замыкание на землю фазы С. Осциллограммы напряжений представлены на рис. 5 и 6.

Максимальные перенапряжения согласно рис. 5 составляют (изолированная нейтраль):

- фаза А: $2.60 \cdot U_{\text{ФМ}}$;
- фаза В: $2.80 \cdot U_{\text{ФМ}}$;
- фаза С: $1.42 \cdot U_{\text{ФМ}}$;
- нейтраль: $1.80 \cdot U_{\text{ФМ}}$.

Максимальные перенапряжения согласно рис. 6 составляют (СОТ резистивного типа в нейтрали):

- фаза А: $1.44 \cdot U_{\text{ФМ}}$;
- фаза В: $1.75 \cdot U_{\text{ФМ}}$;
- фаза С: $1.42 \cdot U_{\text{ФМ}}$;
- нейтраль: $1.09 \cdot U_{\text{ФМ}}$.

Видно, что применение СОТ резистивного типа в нейтрали позволяет уменьшить вероятность эскалации напряжений при длинах линий от 71 % до 100 % критической длины.

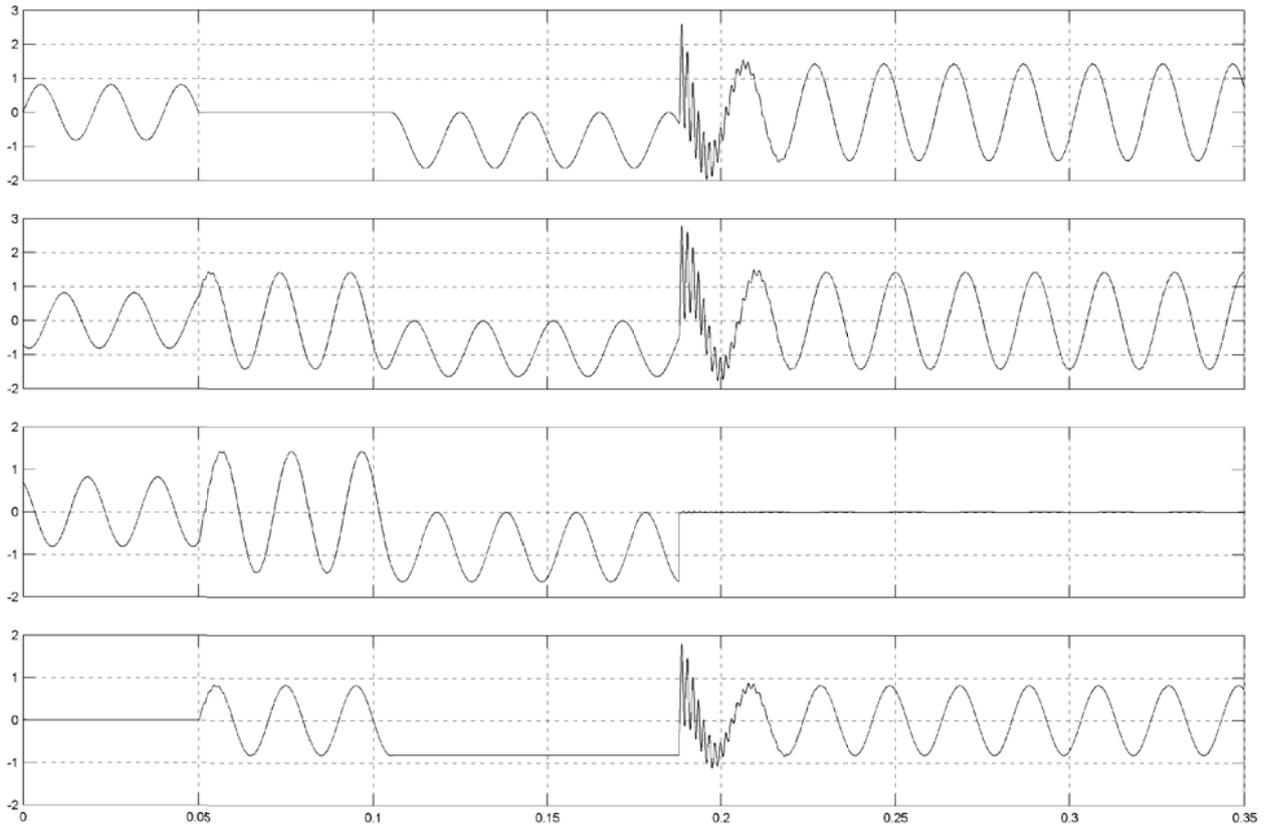


Рис. 5. Осциллограммы напряжений в фазах А, В, С и в нейтрали (сверху вниз соответственно) при изолированной нейтрали.

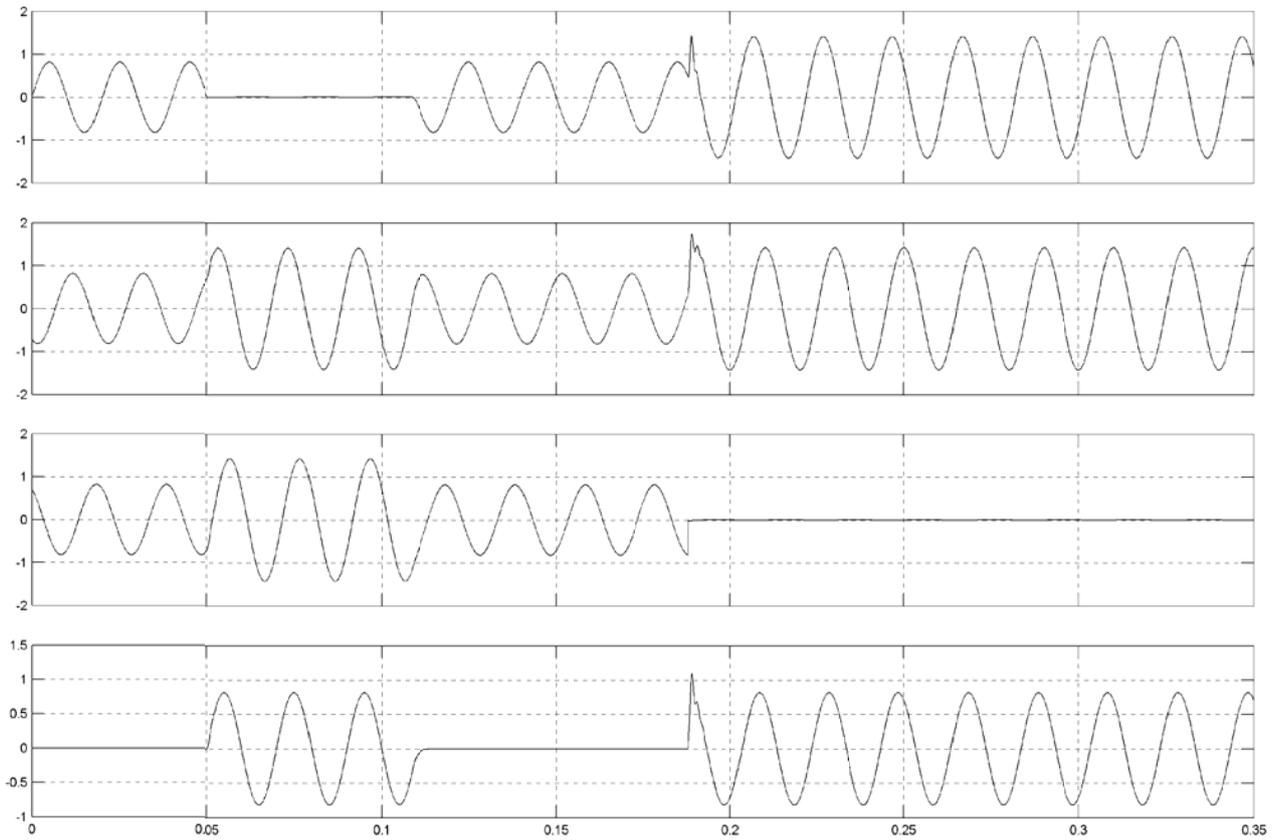


Рис. 6. Осциллограмма напряжений в фазах А, В, С и в нейтрали (сверху вниз соответственно) при СОР резистивного типа в нейтрали.

Теперь рассмотрим режим включения СОТ резистивного типа параллельно ДГР в нейтраль электрической сети, представленный на рис. 7.

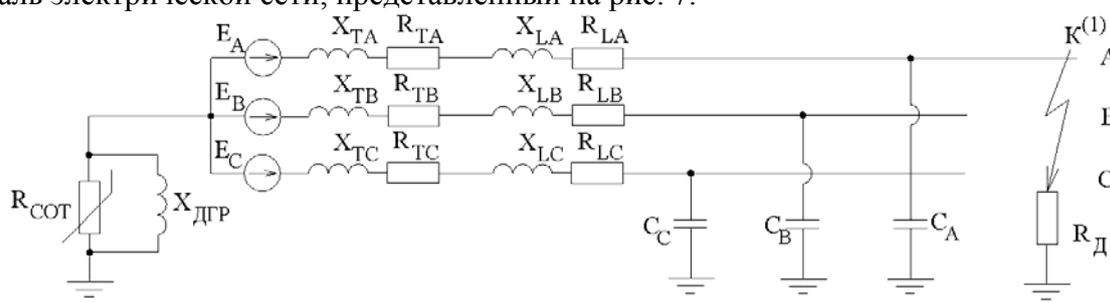


Рис. 7. Схема замещения для расчёта ОЗНЗ сети с СОТ резистивного типа параллельно ДГР в нейтрали.

С учётом требований п. 1.7.97 ПУЭ [3] к сопротивлению заземляющих устройств, используемых одновременно для электроустановок до и выше 1000 В пусть в сверхпроводящем состоянии СОТ имеет сопротивление 4 Ома, а в проводящем 500 Ом, постоянная времени реагирования составляет 10 мс.

Режимом сети будет являться дуговое замыкание (сопротивление дуги $R_D = 1$ Ом), замыкание в фазы А происходит в момент $t = 0.05$ сек, в момент времени $t = 0.1$ сек замыкание устраняется, в момент времени $t = 0.188$ сек происходит замыкание на землю фазы С. Осциллограммы напряжений представлены на рис. 8 и 9.

Максимальные перенапряжения согласно рис. 8 составляют (ДГР в нейтрали):

- фаза А: $2.26 \cdot U_{ФМ}$;
- фаза В: $2.46 \cdot U_{ФМ}$;
- фаза С: $1.44 \cdot U_{ФМ}$;
- нейтраль: $1.57 \cdot U_{ФМ}$.

Максимальные перенапряжения согласно рис. 9 составляют (СОТ резистивного типа параллельно ДГР в нейтрали):

- фаза А: $1.41 \cdot U_{ФМ}$;
- фаза В: $1.73 \cdot U_{ФМ}$;
- фаза С: $1.41 \cdot U_{ФМ}$;
- нейтраль: $1.06 \cdot U_{ФМ}$.

Видно, что применение СОТ резистивного типа параллельно ДГР в нейтрали позволяет уменьшить вероятность эскалации напряжений при длинах линий свыше критической.



Рис. 8. Осциллограммы напряжений в фазах А, В, С и в нейтрали (сверху вниз соответственно) рассматриваемого примера с ДГР.

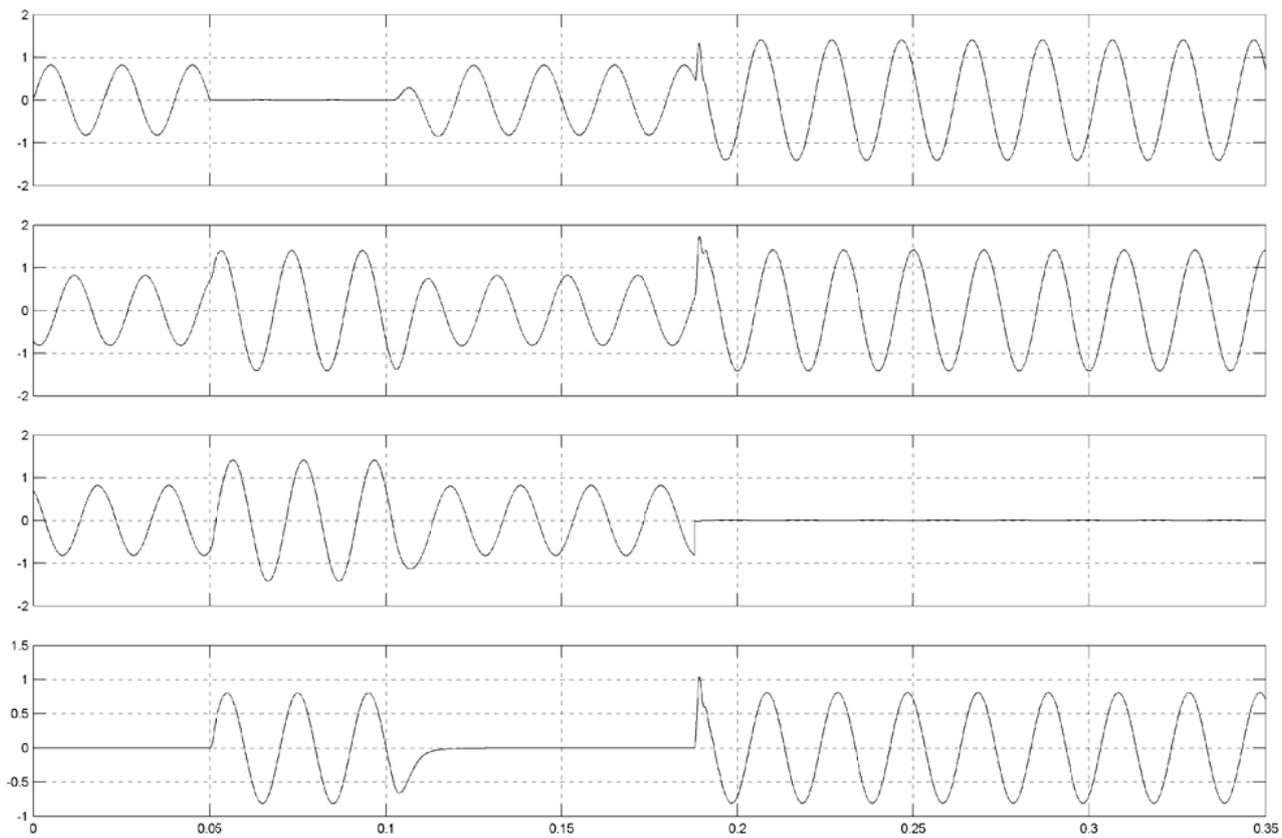


Рис. 9. Осциллограммы напряжений в фазах А, В, С и в нейтрали (сверху вниз соответственно) рассматриваемого примера с ДГР с параллельно включенным СОР.

Теперь рассмотрим режим включения СОТ индуктивного типа в нейтраль электрической сети, представленный на рис. 10.

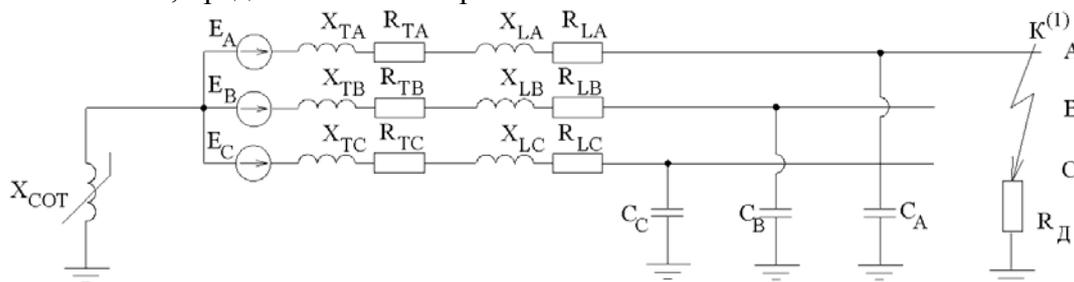


Рис. 10. Схема замещения для расчёта ОЗНЗ в сети с СОТ индуктивного типа в нейтрали.

С учётом требований п. 1.7.97 ПУЭ [3] к сопротивлению заземляющих устройств, используемых одновременно для электроустановок до и выше 1000 В, пусть в сверхпроводящем состоянии СОТ имеет индуктивность 12.7 мГн (индуктивное сопротивление 4 Ом), а в проводящем 1.69 Гн, постоянная времени реагирования составляет 10 мс.

Режимом сети будет являться дуговое замыкание (сопротивление дуги $R_D = 1$ Ом), замыкание в фазы А происходит в момент $t = 0.05$ сек, в момент времени $t = 0.1$ сек замыкание устраняется, в момент времени $t = 0.188$ сек происходит замыкание на землю фазы С. Осциллограммы напряжений представлены на рис. 11.

Максимальные перенапряжения составляют (СОТ индуктивного типа в нейтрали) согласно рис. 11 составляют:

- фаза А: $1.58 \cdot U_{ФМ}$;
- фаза В: $1.84 \cdot U_{ФМ}$;
- фаза С: $1.46 \cdot U_{ФМ}$;
- нейтраль: $1.12 \cdot U_{ФМ}$.

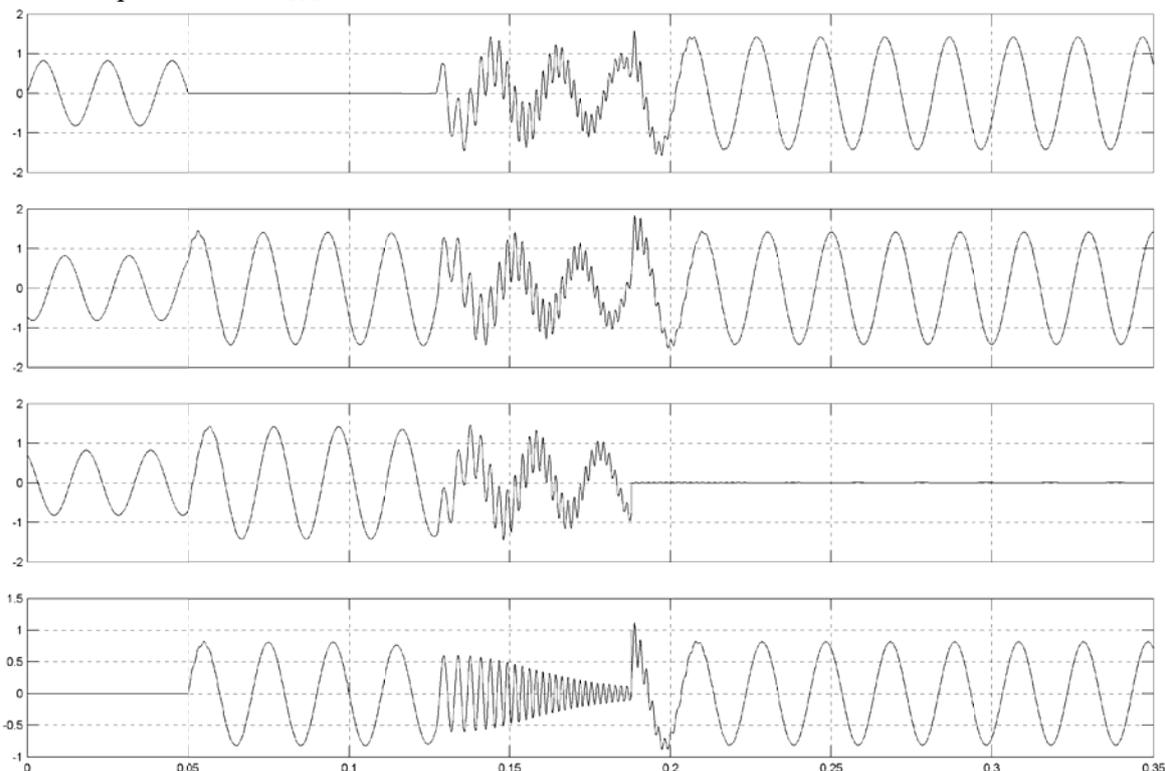


Рис. 11. Осциллограммы напряжений в фазах А, В, С и в нейтрали (сверху вниз соответственно) рассматриваемого примера с СОТ индуктивного типа в нейтрали.

Из рис. 11 видно, что применение СОТ индуктивного типа в нейтрали позволяет уменьшить вероятность эскалации напряжений при длинах линий свыше критической при одновременном обеспечении ограничения тока ОЗНЗ устройством.

Выводы

В качестве обобщения представим области применения СОТ в нейтральных электрических сетях среднего напряжения в нормальном и аварийном режимах работы в таблице 3.

Таблица 3.

Области применения СОТ в нейтральных электрических сетях среднего напряжения в нормальном и аварийном режимах работы с указанием достигаемого эффекта.

Схема включения СОТ в нейтраль	Достижимый эффект при установке СОТ	
	Нормальный режим работы сети	Аварийный режим работы сети
СОТ резистивного типа	Уменьшение смещения нейтрали по сравнению со случаями значительной несимметрии линии и изолированной нейтрали	Для СОТ многократного срабатывания: в линиях протяжённостью от 71% до 100% критической длины позволяет уменьшать вероятность эскалации напряжений
СОТ резистивного параллельно ДГР	Уменьшение смещения нейтрали по сравнению со случаями даже незначительной несимметрии линии	Для СОТ многократного срабатывания: в линиях протяжённостью свыше критической длины позволяет уменьшать вероятность эскалации напряжений
СОТ индуктивного типа	Уменьшение смещения нейтрали по сравнению со случаями даже незначительной несимметрии линии	Для СОТ многократного срабатывания: в линиях протяжённостью свыше критической длины позволяет уменьшать вероятность эскалации напряжений при одновременном ограничении тока ОЗНЗ

Литература

1. **Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей** : утв. Минэнерго 13.01.03 : ввод. в действие с 01.07.03. – М. : НЦ ЭНАС. – 2007. – 304 с. – ISBN 5-93196-724-0
2. **Михеев П. А.** К вопросу о применимости сверхпроводниковых токоограничителей в нейтральных электрических сетях 6 – 35 кВ / В. З. Манусов, П. А. Михеев // *Электро*. – 2007. – № 5. – С. 23–26. – ISSN 1995-5685
3. **Правила устройства электроустановок**. 7-е изд. М. : НЦ ЭНАС, 2006 г. – 552 с. – ISBN 5-93196-646-3
4. **Базуткин В. В.** Техника высоких напряжений (изоляция и перенапряжения в электрических системах) : учебн. для вузов / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь [и др.] ; под общ. ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с. : ил.