

РЕЖИМИ НА РАБОТА НА НЕУТРАЛАТА В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Владимир Перпелицев, Иван Стоилов

Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ: Направен е обзор на прилаганите режими на работа на неутралата в електрическите мрежи средно напрежение по света и у нас. Основно е разгледана системата със заземен през дъгогасителен реактор звезден център. Изведени са аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и тока на земно съединение. Коментирани са предимствата и недостатъците на системата със заземена неутрала през дъгогасителен реактор.

SISTEM EARTHING IN THE MIDDLE VOLTAGE ELECTRICAL GRIDS

Vladimir Perpelitsev, Ivan Stoilov,

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT: In the report is made survey on the used system earthing in the middle voltage electrical grids around the world and in our country. Underlying is considered sistem earthing with Petersen coil. They are led analytic equations for voltage with zero succession, voltages compared to earth and earth fault current. It's made analyses for advantages and disadvantages of system earthing with Petersen coil.

1.1 Режими на работа на неутралата на мрежите средно напрежение по света.

В световната практика се използват следните начини на заземяване на звездния център на трансформаторите (неутралата) в мрежите средно напрежение:

-с изолиран звезден център;

-с със заземен през дъгогасителен реактор звезден център;
-с със заземен през активно (нискоомно или високоомно) съпротивление звезден център;
-с със директно заземен звезден център.

В таблица 1 са дадени примери за начините на заземяване на неутралата в различните страни [10].

Таблица 1

Страна	Номинално Напрежение в kV	Начин на заземяване на неутралата			
		Изолирана	Дъгогасящ реактор	Резистор	Директно заземена
Русия	6-35	+	+		
Австралия	11-12			+	+
Канада	4-25			+	+
САЩ	4-25			+	+
Испания	10-30			+	+
Италия	10-20	+			
Португалия	10-30			+	
Франция	12-24			+	
Япония	6,6			+	
Германия	10-20		+		
Австрия	10-30		+		
Белгия	6,3-17			+	
Великобритания	11			+	+
Швейцария	10-20	+	+		
Финландия	20				

Както се вижда от таблица 1 изолираната неутрала не намира широко приложение. Съществен недостатък е, че при поява на земно съединение, ако то не бъде изключено, може да възникнат и други земни съединения, което да доведе до изключването на няколко кабелни извода или електропровода.

В Русия заземяването на неутралата през дъгогасителен реактор намира приложение при разклонените кабелни мрежи на промишлени предприятия и градове. В много западни страни като Германия, Австрия, Швейцария, Финландия, Швеция този режим на заземяване се използва основно в мрежи с въздушни линии.

Заземяването чрез активно съпротивление намира най-широко приложение в световен мащаб, с изключение на Русия.

При заземяване на неутралата през високоомно съпротивление, токът в мястото на земното съединение, трябва да е равен или по голям от капацитивния ток в мрежата.

При нискоомно заземление на неутралата се създава ток от порядъка на 10-2000А.

Режимът с директно заземена неутрала е широко разпространен в САЩ, Канада, Австралия, Великобритания. Той намира широко приложение в четирипроводните въздушни линии средно напрежение 4-25кV, където от захранващия трансформатор до понижавачите трансформатори, освен фазовите проводници се изтегля и нулевия проводник. Този метод на заземяване не се използва при наличие на високоволтови електро-двигатели, тъй като токът на еднофазно земно съединение достига няколко килоампера, което води до повреждането им.

1.2 Режими на работа на неутралата на мрежите средно напрежение у нас.

Реализираният режим на работа на неутралите на захранващите електрическите уредби силови трансформатори на страна СрН, за най-широко използваното номинално напрежение – 20 kV, е илюстриран на фиг. 1[3]. Както се вижда, на практика се използват всички основни режими на заземяване на неутралата (АС - активно съпротивление; ДР – дъгогасителен реактор(и); К - комбинирано; И - изолирана, както и комбинации от тях (АС/ДР; АС/К).



Фиг. 1

Проблемите на мрежите средно напрежение, работещи с изолиран звезден център, са предмет на множество публикации[1,2,7]. Предложеният подход в [8] за аналитично изразяване на основните електрически параметри дава в по-обобщена форма зависимостите между характерните величини. Този подход ще бъде използван за извеждане на аналитичните зависимости в мрежите средно напрежение, работещи с компенсирана неутрала.

2.1 Система със заземен през дъгогасителен реактор звезден център

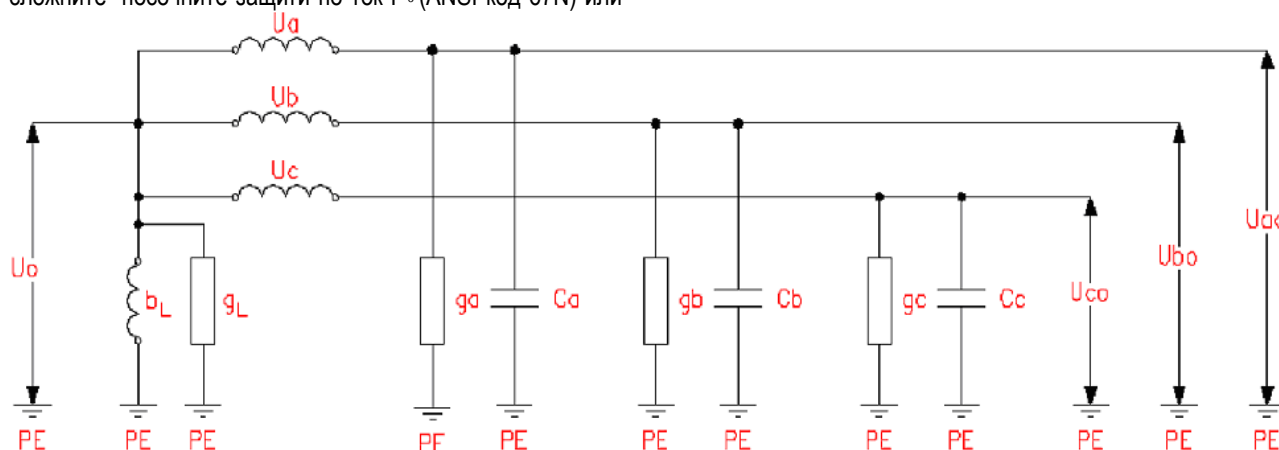
Този начин на заземяване на неутралата се прилага главно при кабелни и въздушно кабелни разклонени мрежи с голяма обща дължина. За присъединяване на компенсиращата индуктивност се прилагат специални трансформатори за извеждане на неутралата със свързване на намотките Y-0/D или Z-0. При еднофазно земно съединение в мрежата дъгогасящият реактор създава в мястото на повредата индуктивна съставлява равна на капацитивния ток. При това сумарният ток в мястото на повредата става практически равен на нула и първото възникнало в мрежата еднофазно земно съединение може да не се изключва. В практиката се използват реактори с различни методи за регулиране на индуктивността: на степени-чрез промяна на брой на включените намотки; плавно- чрез реактори с подмагнитване или с изменение на въздушната междина в магнитната система (плунжерни реактори).

Преимствата на този метод на заземяване на неутралата са[4,10]:

- малък ток в мястото на повредата;
 - не е необходимо веднага да се изключва първото земно съединение;
 - възможност за самоликвидация на еднофазното земно съединение, възникнало на въздушни линии (при точна настройка на дъгогасящия реактор в резонанс);
 - изключване на ферорезонансни процеси, свързани с наситени измервателни напрежителни трансформатори.
- Недостатъците на този режим на работа на звездния център на трансформатора са:
- възможност за възникване на дъгови пренапрежения при значително разстройване на компенсацията;
 - възможност за възникване на многоместни повреди при продължителни дъгови земни съединения;
 - възможност за прерастване на еднофазното земно съединение в двуфазно при значително разстройване на компенсацията;
 - трудно се открива мястото на повредата;
 - съществува опасност от електропоражения на персонала при продължителна работа в режим на еднофазно земно съединение;
 - трудно се обезпечават правилната работа на релейната защита от земни съединения, тъй като токът в повредения извод е незначителен.

Електрическите мрежи в откритите рудници са изградени от силно разклонена въздушно-кабелна мрежа. Кабелната изолация, за разлика от въздушната, не е самовъзстановяваща се. Следователно за рудничните мрежи самовъзстановяването не е съществено предимство. Не съществува и като предимство възможността за работа в режим на еднофазно земно съединение, поради изискванията на Правилника за безопасността на труда при разработване на находищата по открит начин[6].

В мрежите за средно напрежение в редица европейски страни (Германия, Франция, Италия, Полша, Румъния, Финландия, Швеция, Норвегия, а напоследък и в Русия) широко се използва заземление на неутралата през дъгогасящ реактор с шунтиращ резистор. Нисковолтният шунтиращ резистор за напрежение 500 V се свързва чрез специален контактор към вторичната намотка на дъгогасящия реактор. Това техническо решение позволява организиране на селективна защита от земни съединения с прости токови защиты(ANSI код 51G) така и с по-сложните- посочните защиты по ток I_{I_0} (ANSI код 67N) или



Фиг.2

В компенсирани мрежи напрежението на неутралата $\dot{U}_0$, както и напреженията на фазите спрямо земя $\dot{U}_{a0}, \dot{U}_{b0}, \dot{U}_{c0}$ и токовете на утечка са функции на:

- формата и амплитудата на фазните напрежения $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$;
- активните изолационни проводимости g_a, g_b, g_c ;
- съсредоточените утечки g_a^I, g_b^I, g_c^I ;
- капацитетите спрямо земя C_a, C_b, C_c ;
- активната проводимост на дросела спрямо земя- g_L ;
- индуктивната проводимост на дросела спрямо земя-

$$b_L = \frac{1}{\omega L};$$

- активните и индуктивните проводимости на фазовите проводници;
- големината на товара в линията;

При теоретични изследвания се приема синусоидалност на фазните напрежения, линейност и съсредоточеност на

активната мощност с нулева последователност(ANSI код 32). Анализът на публикации относно режима на работа на звездния център на мрежите средно напрежение показва, че голяма част от авторите препоръчват като най-перспективен режим на заземяване с дъгогасителен реактор плунжерен тип, с допълнителна вторична намотка за включване на резистор и микропроцесорно автоматично управление. Противниците на този режим изтъкват като недостатък главно сложността на устройствата за управление.

2.2 Аналитични зависимости в системи със заземен през дъгогасителен реактор звезден център.

На фиг 2 е дадена заместваща схема на система със заземен през дъгогасителен реактор звезден център.

всички проводимости, еднаквост на потенциала във всички точки на мрежата.

В общия случай се допуска че, съществува несиметрия на активната изолационна проводимост $g_a \neq g_b \neq g_c$, несиметрия в капацитета спрямо земя $C_a \neq C_b \neq C_c$, и е възможна поява на съсредоточени утечки и в трите фази $g_a^I \neq g_b^I \neq g_c^I$ [8]. При възприетите допускания напрежението на звездния център $\dot{U}_0$ се определя по формулата:

$$\dot{U}_0 = U \frac{g_a + g_a^I + a^2(g_b + g_b^I) + a(g_c + g_c^I) + j(C_a + a^2 C_b + a C_c)}{g_a + g_a^I + g_b + g_b^I + g_c + g_c^I + j(C_a + C_b + C_c) + (g_L - j b_L)}; (1)$$

Експерименталните изследвания на електро-разпределителните мрежи средно напрежение в рудниците у нас показват, че капацитивната изолационна проводимост е многократно по-голяма от активната 10^3 до 10^4 пъти. Следователно анализът на тези мрежи с достатъчна точност може да се направи, като се пренебрегне несиметрията в активната изолационна проводимост[9].

При заземен през дъгогасителен реактор звезден, център уравнението за напрежението на неутралата $\dot{U}_o$ при еднофазна утечка във фаза А е:

$$\dot{U}_o = U \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + g_a^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_a^I + (g_L - jb_L)} \quad (2)$$

където:

$\dot{K}_c = \frac{C_a + a^2 \cdot C_b + aC_c}{C_a + C_b + C_c}$ - коефициент на несиметрия на

капацитета;

$$C_0 = \frac{C_a + C_b + C_c}{3};$$

$$\text{tg} \delta = \frac{g_0}{\omega C_0}; \quad g_0 = \frac{g_a + g_b + g_c}{3}$$

Уравненията за напреженията на фазите спрямо земя при еднофазна утечка във фаза А са:

$$\dot{U}_{ao} = U \left[1 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + g_a^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_a^I + (g_L - jb_L)} \right]; \quad (3)$$

$$\dot{U}_{bo} = U \left[a^2 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + g_a^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_a^I + (g_L - jb_L)} \right]; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{co} = U \left[a - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + g_a^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_a^I + (g_L - jb_L)} \right]. \quad (5)$$

При еднофазна утечка във фаза В:

$$\dot{U}_o = U \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + a^2 g_b^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_b^I + (g_L - jb_L)}; \quad (6)$$

$$\dot{U}_{ao} = U \left[1 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + a^2 g_b^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_b^I + (g_L - jb_L)} \right]; \quad (7)$$

$$\dot{U}_{bo} = U \left[a^2 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + a^2 g_b^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_b^I + (g_L - jb_L)} \right]; \quad (8)$$

$$\dot{U}_{co} = U \left[a - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + a^2 g_b^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_b^I + (g_L - jb_L)} \right]. \quad (9)$$

При еднофазна утечка във фаза С:

$$\dot{U}_o = U \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + ag_c^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_c^I + (g_L - jb_L)}; \quad (10)$$

$$\dot{U}_{ao} = U \left[1 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + ag_c^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_c^I + (g_L - jb_L)} \right]; \quad (11)$$

$$\dot{U}_{bo} = U \left[a^2 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + ag_c^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_c^I + (g_L - jb_L)} \right]; \quad (12)$$

$$\dot{U}_{co} = U \left[a - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + ag_c^I}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_c^I + (g_L - jb_L)} \right]. \quad (13)$$

Токът през еднофазна съсредоточена утечка е:

-при утечка във фаза А:

$$\dot{I}_a = U g_a^I \left[1 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + g_a^I + (g_L + jb_L)}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_a^I + (g_L + jb_L)} \right]. \quad (14)$$

-при утечка във фаза В:

$$\dot{I}_b = U g_b^I \left[a^2 - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + a^2 g_b^I + (g_L + jb_L)}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_b^I + (g_L + jb_L)} \right]. \quad (15)$$

-при утечка във фаза С:

$$\dot{I}_c = U g_c^I \left[a - \frac{3j \cdot \omega \cdot C_0 \dot{K}_c + ag_c^I + (g_L + jb_L)}{3\omega \cdot C_0 (\text{tg} \delta + j) + g_c^I + (g_L + jb_L)} \right]. \quad (16)$$

Получените общи зависимости дават възможност за количествени анализи на амплитудни и фазови характеристики на електрическите параметри в стационарен режим при отчитане на несиметрията на капацитета на фазите спрямо земя. Дадените аналитични зависимости могат да бъдат използвани, за оценка на електробезопасността, за анализ на работата на защити и устройства за мрежи с компенсирана през дъгогасителен реактор неутрала.

Литература

1. Анев Г., Полуетективно заземяване на звездния център на мрежите за средно напрежение в откритите рудници. Годишник на Минно-геоложки университет "Св.Иван Рилски" т.40, св. III "Механизация, електрификация и автоматизация на минното производство" София, 1994.
2. Багаев Д.В., В.Н.Сазонов, С.О.Астафьев, В.И.Кучеренко. Резистивное заземление нейтрали сетей 6-35 кВ в ОАО "МРСК Волги". КАБЕЛЬ-news, № 3, 2009.
3. Вичев Станимир. Земни съединения и земни защити в мрежи с изолирана неутрала- публикация в интернет. По материали на инж. Росен Мирчев, ЕСО-ЕАД, януари 2008 г.
4. Миронов И.А., Проблемы выбора режимов заземления нейтрали в сетях 6-35кВ "ЭЛЕКТРО" № 5, 2006.
5. НАРЕДБА № 3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии. Обн., ДВ, бр.90 и 91 от 2004г
6. ПРАВИЛНИК за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин. Министерство на труда и социалните грижи. Главна инспекция по труда. София, 1996.

7. Сирота И.М., С.Н.Кисленко, А.М.Михайлов. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев, Научна думка, 1985.
8. Стоилов, Ив. За несиметрията на проводимостта спрямо земя в мрежите с изолиран звезден център.- Год. ВМГИ, т. XXXIV, 1987-1988.
9. Стоилов, Ив. Защитни устройства с бързодействащо предпазно шунтиране за електрическите мрежи с изолиран звезден център и напрежение 6 kV.- Год. ВМГИ, 1989, т. XXXV, св. IV, 215-223.
10. Титенков С.С. 4 режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона. ж. "Новости электротехники" №5(23), 2003.