



ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОСТОЯНИЙ РАВНОВЕСИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА

И.Е. Кажекин, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный технический университет»
e-mail: kazhekin@mail.ru

В работе рассмотрены процессы, протекающие в феррорезонансном контуре. Актуальность исследования обусловлена возможностью применения резонансного заземления нейтрали в судовых электросистемах, обладающего некоторыми особенностями реализации. В работе обосновано условие оценки устойчивости равновесных состояний контура и предложено его использование для оценки возможности возникновения феррорезонанса напряжений.

феррорезонанс напряжений, однофазные замыкания, устойчивость, режим нейтрали, судовые электросистемы. компенсированная нейтраль

Введение

подавляющее большинство судов мирового флота эксплуатируется с электросетями, имеющими изолированную нейтраль. Известно, что в таких электросетях величина тока в месте замыкания фазы на корпус пропорциональна фазной емкости сети. На объектах морской техники, обладающих достаточно протяженными и разветвленными кабельными сетями, величина тока однофазного замыкания может достигать значений, при которых возможны возникновения пожаров, взрывов, смертельных электротравм. Одним из наиболее предпочтительных способов защиты от однофазных замыканий следует признать изменение режима нейтрали электросети путем ее перевода в режим компенсированной нейтрали [1]. Такое техническое решение редко используется, однако постепенно приобретает актуальность в современных условиях, когда, с одной стороны, происходит рост электроэнерговооруженности судов, сопровождающийся увеличением опасности однофазных замыканий, а другой – резкий рост ущерба, наносимого судовыми пожарами [2].

Переход к компенсированной нейтрали позволяет одновременно снизить токи однофазных замыканий и уменьшить максимальные кратности дуговых перенапряжений при резонансной настройке реактора, включенного в нейтраль электросети [3]. Однако при отклонении от резонансной настройки возможно значительное увеличение перенапряжений, сопровождающееся протеканием феррорезонансных процессов. Опасность таких процессов обусловлена возникновением сверхтоков в образовавшемся контуре и увеличением напряжений на его элементах [4]. Эти перенапряжения охватывают всю сеть, воздействуя на изоляцию между неповрежденными фазами и корпусом судна, и при наличии в ней ослабленных участков перенапряжения способны вызывать их пробой, в результате чего однофазное замыкание перейдет в более опасные виды замыкания, которые могут привести к воспламенению изоляции с дальнейшим разрастанием огня без поддержки заземляющих дуг [5].

Исследование возможности возникновения феррорезонанса невозможно без подробного анализа процесса в возникающем после замыкания на корпус фазы контуре. Часто при изучении феррорезонансных процессов ограничиваются лишь результатами численного моделирования [6]. Однако такой подход не позволяет в полной мере оценить влияние парамет-

ров контура и начальных условий на возможность возникновения феррорезонанса. Ниже в работе приведено обоснование аналитического выражения, позволяющего это реализовать.

Методика исследований

Процесс формирования феррорезонансного контура достаточно подробно описан в [7]. Схема образующегося при замыкании фазы на корпус судна контура приведена на рис. 1.

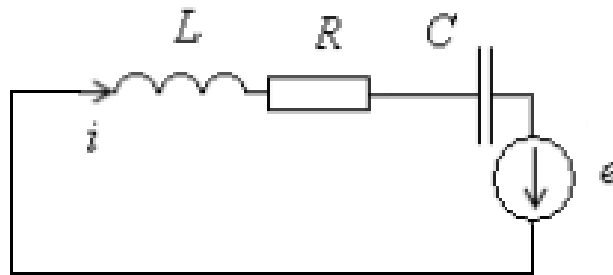


Рисунок 1 – Схема феррорезонансного контура

Предложенный подход к оценке возможности возбуждения феррорезонансных колебаний основан на определении неустойчивой точки равновесия электрической цепи. Как известно, феррорезонансный контур может иметь до трех точек равновесия. При этом две из них являются устойчивыми, а одна – нет. Границы области неустойчивых возможных состояний контура могут быть определены на основе метода Ван дер Поля.

Контур, представленный на рис. 1, описывается при помощи следующего выражения:

$$L \frac{di}{d\tau} + Ri + \frac{1}{\omega \cdot C} \int i d\tau = e(\tau), \quad (1)$$

где L, R, C – параметры контура; $\omega, i, e(\tau)$ – частота, ток и ЭДС контура.

Решения уравнения (1) с учетом нелинейности индуктивности, полученные численным методом, представлены на рис. 2.

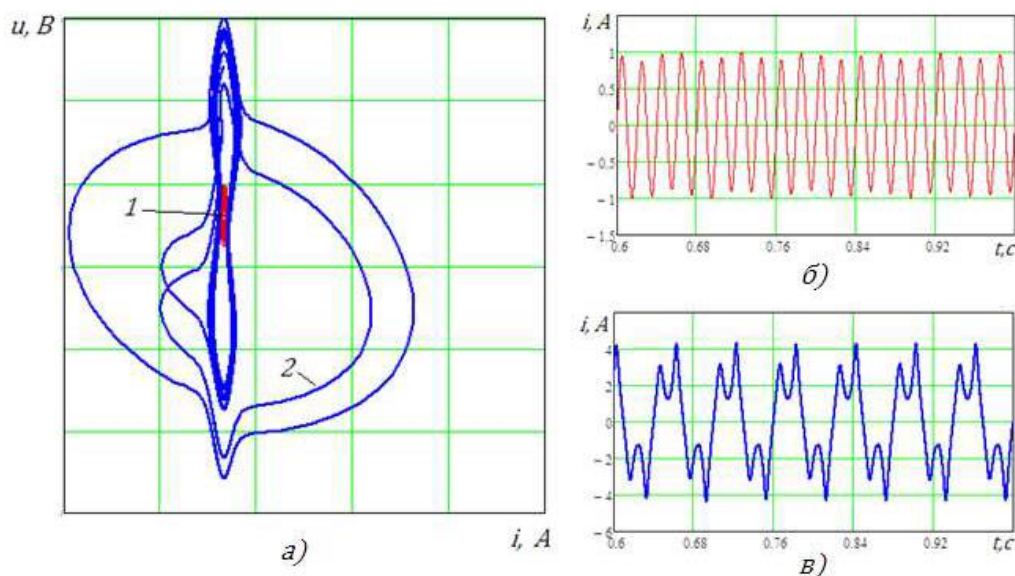


Рисунок 2 – Решения уравнения (1) с учетом нелинейности индуктивности:
1 – нерезонансное состояние; 2 – феррорезонансное состояние

а) фазовый портрет феррорезонансного контура; б) изменение тока контура в установившемся режиме в нерезонансном состоянии; в) изменение тока контура в установившемся режиме в резонансном состоянии

Решения во многом определяются начальными условиями. В зависимости от них контур может оказаться в нормальном (нерезонансном) или в феррорезонансном состоянии. Определение возможности перехода системы в состояние нелинейного резонанса предлагается выполнить исходя из следующего. Если параметры, характеризующие режим цепи (ток контура и напряжение на емкостном элементе), в какой-либо момент, включая начальный, окажутся вне области устойчивого состояния, то в системе может возникнуть феррорезонанс.

Для определения границ области нерезонансных состояний системы необходимо определить точки равновесия. Для этого выражение (1) может быть приведено к уравнению гармонического осциллятора:

$$\frac{d^2 i}{d\tau^2} + i = \frac{1}{\omega L} \left[\frac{du}{d\tau} - R \frac{di}{d\tau} - \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right) i \right] \quad (2)$$

В точках равновесия правая часть выражения (2) принимает нулевое значение. Согласно методу Ван дер Поля можно принять следующие условия:

$$\begin{cases} u = U \cos(\tau); \\ i = I \cos(\tau - \varphi). \end{cases} \quad (3)$$

Подставив выражения (3) в левую часть уравнения (2) и приняв величины амплитуды тока и фазы медленно меняющимися во времени параметрами режима, т.е. $i = I(\tau)$, $\varphi = \varphi(\tau)$, можно получить следующее выражение:

$$\frac{d^2 i}{d\tau^2} + i = -2 \left[\frac{dI}{d\tau} \sin(\theta) - I \frac{d\varphi}{d\tau} \cos(\theta) \right] \quad (4)$$

Используя таким же образом выражения (3), только без учета изменения величин амплитуды тока I и фазы φ , для правой части уравнения (2), можно перейти к выражению следующего вида:

$$\begin{aligned} & -2 \left[\frac{dI}{d\tau} \sin(\theta) - I \frac{d\varphi}{d\tau} \cos(\theta) \right] = \\ & = \left[\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I - U \sin(\varphi) \right] \cdot \cos(\theta) + (R \cdot I - U \cos(\varphi)) \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

Приравнявая множители $\sin(\theta)$ и $\cos(\theta)$ можно перейти к системе уравнений:

$$\begin{cases} -2 \frac{dI}{d\tau} = R \cdot I - U \cos(\varphi); \\ 2I \frac{d\varphi}{d\tau} = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I - U \sin(\varphi). \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы (6) является точками равновесия.

Исследование устойчивости

При анализе устойчивости принимается, что произошли малые отклонения от установившихся значений фазы и амплитуды тока: $\varphi = \varphi_0 + \sigma(\tau)$ и $I = I_0 + \rho(\tau)$. С учетом этого система (6) может быть преобразована следующим образом:

$$\begin{cases} -2 \frac{d\rho}{d\tau} = \frac{1}{\omega L(I_0)} [U \sin(\varphi_0) \cdot \sigma(\tau) + R \cdot \rho(\tau)]; \\ 2(I_0 + \rho(\tau)) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{\omega L} \left[\left(\left(\frac{dU_L(I_0)}{dI_0} I_0 - \frac{I_0}{\omega C} \right) \cdot \rho(\tau) - U \cos(\varphi_0) \cdot \sigma(\tau) \right) \right]; \end{cases} \quad (7)$$

где $U_L(I)$ - вольтамперная характеристика нелинейного реактора.

Учитывая, что отклонение от амплитуды тока пренебрежимо мало по сравнению с самой амплитудой, система (7) может быть упрощена. Ее запись в операторной форме выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} (R + 2\omega \cdot L_0 \cdot p) \cdot \rho(p) + \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right) \cdot \sigma(p) = 2 \cdot \omega \cdot L_0 \cdot \rho(0) \cdot p; \\ \frac{1}{I_0} \frac{d \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right)}{dI_0} \rho(p) - (R + 2 \cdot \omega \cdot L_0 \cdot p) \cdot \sigma(p) = -2 \cdot \omega \cdot L_0 \cdot \sigma(0) \cdot p. \end{cases} \quad (8)$$

Определитель системы (8) имеет следующий вид:

$$D(p) = -(R + 2\omega \cdot L_0 \cdot p)^2 - \frac{1}{I_0} \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right) \frac{d \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right)}{dI_0} \quad (9)$$

Корни системы уравнений находятся следующим образом:

$$p = \frac{1}{2\omega L_0} \left(-R \pm \sqrt{-\frac{1}{I_0} \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right) \frac{d \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right)}{dI_0}} \right) \quad (10)$$

Согласно выражению (10) корни могут принимать положительные значения только при выполнении условия:

$$\left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right) \frac{d \left(U_L(I_0) - \frac{I_0}{\omega C} \right)}{dI_0} + I_0 \cdot R^2 < 0 \quad (11)$$

При выполнении условия (11) система не может иметь устойчивого состояния. Поэтому при достижении одним из параметров режима значений, удовлетворяющих этому условию, феррорезонансный контур потеряет устойчивость.

Заключение

Решение (11) позволяет установить границы области устойчивого нерезонансного состояния контура. Используя полученное выражение, можно оценить возможность возникновения феррорезонанса на основе данных о начальных условиях контура до замыкания фазы. При этом наиболее неблагоприятные начальные условия могут быть определены из режима, предшествующего однофазному замыканию, например, по степени несимметрии бортовых электросетей или напряжению смещения нейтрали.

Описанные в работе исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00622.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кажекин, И.Е. Определение требований к защите судовых электроэнергетических систем от однофазных замыканий / И.Е. Кажекин // Электрика. – 2011. – № 3. – С. 35-38.
2. Ищенко, А.Д. Пожарная опасность и особенности тушения пожаров энергетических установок и помещений судов / А.Д. Ищенко, В.В. Роевко, И.Г. Малыгин // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т.1. № 1 (39). – С. 88-94.
3. Благинин, В.А. Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали / В.А. Благинин, В.И. Лозовенко, И.Е. Кажекин // Известия КГТУ. – 2008. – № 13. – С. 118-121.
4. Гиндуллин, Ф.А. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ / В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
5. Благинин, В.А. Экспериментальная проверка применимости известных теорий дуговых перенапряжений к судовым низковольтным электросистемам/ В.А. Благинин, И.Е. Кажекин // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2013: XI междунар. науч. конф.: труды. – Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. – С. 384-387.
6. Бейсенби, М.А. Исследование феррорезонансных явлений в электрических сетях / М.А. Бейсенби, А. Ж. Закарина, Ю.Ф. Булатбаева // Труды Университета. – 2016. – № 3 (64). – С. 111-114.
7. Кажекин, И.Е. Феррорезонансные процессы при однофазных замыканиях в судовых электроустановках с компенсированной нейтралью / И.Е. Кажекин // Известия КГТУ. – 2019. – №52. – С. 145-154.

RESEARCH OF STABILITY OF BALANCED CONDITION OF THE FERRORESONANCE CIRCUIT

I.E. Kazhekin, Associate Professor,
Kaliningrad State Technical University,
e-mail: kazhekin@mail.ru

The article considers the processes occurring in the ferroresonance circuit. The relevance of the study of such a circuit is due to the possibility of using resonant neutral grounding in ship electric power systems. In this paper, the condition for estimating the stability of balanced condition of the circuit is substantiated and its use is proposed to assess the possibility of the occurrence of ferroresonance.

Ferroresonance, single-phase fault, stability, neutral mode, ship electrical systems, resonantly grounded neutral