



Modeling Filters of Six Symmetrical Components of Controlled Self-compensating Power Transmission Lines

By Turturica Natalya

Pridnestrovian State University

Abstract- This article discusses the implementation of filters for six symmetrical components of currents (voltages) of a selfcompensating power line (SCPL) and a controlled selfcompensating power line with closely placed phases (CSCPL) Mathematical descriptions of these filters are provided. The principle of implementation of relay protection based on the allocation of six symmetrical components of currents (voltages) is proposed, which allows to increase its sensitivity and ensure the "survivability" of the SCPL (CSCPL) for various asymmetric short circuits. For this purpose, a structural model of the filter scheme of six symmetrical components is reproduced in the MATLAB & Simulink dynamic modeling environment.

Keywords: *фильтр шести симметричных составляющих, самокомпенсирующейся линии электропередачи (СВЛ).*

GJRE-I Classification: FOR Code: 010399



Strictly as per the compliance and regulations of:



Modeling Filters of Six Symmetrical Components of Controlled Self-compensating Power Transmission Lines

Turturica Natalya

Abstract- This article discusses the implementation of filters for six symmetrical components of currents (voltages) of a self-compensating power line (SCPL) and a controlled self-compensating power line with closely placed phases (CSCPL). Mathematical descriptions of these filters are provided. The principle of implementation of relay protection based on the allocation of six symmetrical components of currents (voltages) is proposed, which allows to increase its sensitivity and ensure the "survivability" of the SCPL (CSCPL) for various asymmetric short circuits. For this purpose, a structural model of the filter scheme of six symmetrical components is reproduced in the MATLAB & Simulink dynamic modeling environment.

Results: The proposed mathematical MATLAB model of filters of six symmetrical components allows their mathematical implementation in the development of relay protection of SCPL (CSCPL).

Keywords: *фильтр шести симметричных составляющих, самокомпенсирующейся линии электропередачи (СВЛ).*

I. ВВЕДЕНИЕ

Один из способов повышения пропускной способности ЛЭП, является внедрение ЛЭП со сближенными одноимёнными фазами так называемые самокомпенсирующиеся ЛЭП (СВЛ) или управляемые самокомпенсирующиеся ЛЭП (УСВЛ), исследование которых были начаты в Московском Энергетическом Институте и Институте Энергетики Академии Наук Молдовы. [1-3]. Отличительная особенность от обычных двухцепных линий этих линий сводиться к тому, что самокомпенсирующаяся линия электропередачи представляет собой двухцепную линию, у которой сближены разноименные фазы разных цепей. Благодаря этому, усиливается электромагнитное влияние между сближенными фазами и обеспечивается естественный 120 градусный угол сдвига напряжений сближенных фаз. Внедрение указанных ЛЭП требует решения целого комплекса вопросов, в том числе расчёта токов коротких замыканий (к.з.) и релейной защиты. Проведенные исследования показали, что расчет различных несимметричных режимов и коротких замыканий.

Author: Turturica Natalya, Pridnestrovian State University.
e-mail: natalya_siti@mail.ru

наиболее целесообразно выполнить, используя шестифазные симметричные составляющие. Кроме того выявлено, что определенным видам к.з. соответствует «появление» определенных симметричных составляющих, что может послужить отличительным признаком данных видов к.з. для релейной защиты [4,5]. Для выявления данных симметричных составляющих необходимы соответствующие фильтры. До настоящего времени проведенные исследования касались только физического выполнения этих фильтров, что вполне приемлемо для традиционных защит. [6-9]. Для современных цифровых и микропроцессорных защит наиболее целесообразно математическое «выделение» данных симметричных составляющих при к.з

Целью данной работы являлось изучение работоспособности фильтров шести симметричных составляющих и выбор наиболее оптимального алгоритма их программного исполнения. Для этого предлагается реализация ниже приведенного алгоритма расчета коэффициентов данных фильтров, а в компьютерном пакете Matlab/Simulink [10,11] осуществлена имитационная модель с целью получения тех или иных симметричных составляющих УСВЛ (СВЛ) для релейной защиты и автоматики. В целом эта модель может быть распространена и применена в принципе к любым многофазным ЛЭП в частности двух цепным, рассматривая их как шестифазные линии.

II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривая УСВЛ(СВЛ) как шестифазные ЛЭП для расчета несимметричных кз и сложных видов повреждений, включая обрывы фаз, можно использовать метод симметричных составляющих. Теоретические основы данного метода были изложены в работах С.Л. Fortescue, а затем R. Evans и С. Wagner и детально рассмотрены в работах [12,13]. Метод основан на разложении несимметричных систем токов (напряжений) при различных повреждениях на шесть симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 последовательностей.

В соответствии с разложением фазные напряжения (токи) в фазах А, А', В, В', С и С', могут быть выражены симметричными составляющими и наоборот следующим образом

$$\dot{F} = \dot{S}_6 \cdot \dot{F}_S; \quad \dot{F}_S = \dot{S}_6^{-1} \cdot \dot{F} \quad (1)$$

где

$$\dot{F} = \begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_D \\ \dot{F}_E \\ \dot{F}_F \end{bmatrix}; \quad \dot{F}_S = \begin{bmatrix} \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_{A1} \\ \dot{F}_{A2} \\ \dot{F}_{A3} \\ \dot{F}_{A4} \\ \dot{F}_{A5} \end{bmatrix}$$

-матрицы векторов фазных напряжений (токов) в координатах шести симметричных составляющих

$$\dot{S}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \end{bmatrix};$$

$$\dot{S}_6^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \end{bmatrix} -$$

квадратные матрицы преобразования из симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 в фазные и обратная матрица S_6

Векторные диаграммы рисунок 1, иллюстрируют по фазное геометрическое разложение несимметричной шестифазной системы на шесть симметричных составляющих системы векторов токов (напряжения) УСВЛ $0 \leq \theta \leq 120^\circ$, где θ это угол сдвига между системами векторов фазных напряжений, в общем, случаи от 0° до 360°

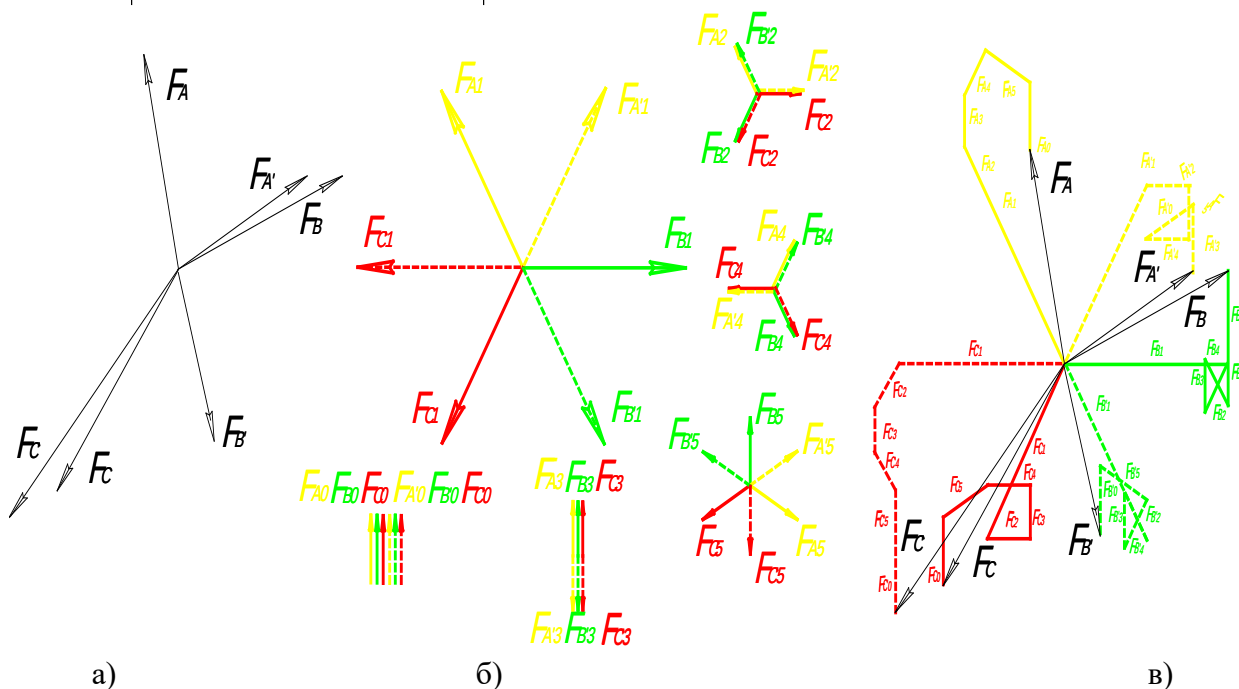


Рис. 1: Векторные диаграммы. а) несимметричная шестифазная система векторов б) вектора симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей; в) по фазное сложение векторов симметричных составляющих.

При сложных видах повреждений УСВЛ (СВЛ) связанные с обрывом фаз или одновременный обрывом и кз присуще определённые симметричные составляющие 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательности. Например граничные условия при обрыве фаз А и А' УСВЛ

$$\begin{aligned} \dot{U}_{LB} &= \dot{U}_{LB'} = \dot{U}_{LC} = \dot{U}_{LC'} = 0; \\ \dot{I}_{LA} &= 0; \quad \dot{I}_{LA'} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно (1) переход от фазных координат к координатам шести симметричных составляющих УСВЛ и наоборот граничные условия примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 + \dot{I}_3 + \dot{I}_5 &= 0; \\ \dot{U}_1 &= \dot{U}_3 = \dot{U}_5 = \frac{1}{6}(\dot{U}_{LA} - \dot{U}_{LA}'); \\ \dot{U}_0 &= \dot{U}_2 = \dot{U}_4 = \frac{1}{6}(\dot{U}_{LA} + \dot{U}_{LA}') \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично можно найти последовательности токов и напряжений возникающих при различной несимметрии. Как было отмечено выше, релейная защита УСВЛ (СВЛ) может быть реализована на основе обнаружения тех или иных соответствующих симметричных составляющих. Для этого необходимы фильтры симметричных составляющих шестифазного разложения.

Фильтр симметричных составляющих напряжения (тока) подключён своими выходными зажимами к УСВЛ и выделяет на своих выходных зажимах напряжение (ток), пропорциональный одной или нескольким симметричным составляющим, подведённых к входным зажимам фильтра рисунк 2.

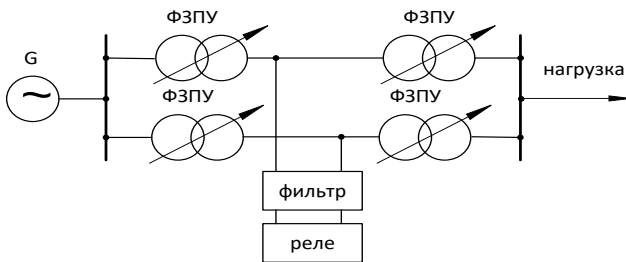


Рис.2. Условная схема подключение фильтра к УСВЛ

При разработке релейной защиты часто появляется задача выделения симметричных составляющих не из фазных величин, а из линейных, например, из линейных напряжений. Рассмотрим, как рассчитать напряжение второй последовательности $\dot{U}_2$, при фиксированном угле регулирования θ , из линейных напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{A'B'}, \dot{U}_{B'C'}$. Линейные напряжения связаны с фазными по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{A'B'} &= \dot{U}_{A'} - \dot{U}_{B'}, \\ \dot{U}_{B'C'} &= \dot{U}_{B'} - \dot{U}_{C'} \end{aligned} \quad (4)$$

Расчёт напряжения второй последовательности согласно (1):

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A + a\dot{U}_{C'} + a^2\dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + a\dot{U}_C + a^2\dot{U}_{B'}) = \\ &= \frac{1}{6}(\dot{U} + a\dot{U}_{C'} + (-1-a)\dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + a\dot{U}_C + (-1-a)\dot{U}_{B'}) = \\ &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A + a\dot{U}_{C'} - \dot{U}_B - a\dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + a\dot{U}_C - \dot{U}_{B'} - a\dot{U}_{B'}) = (5) \\ &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} - a\dot{U}_{BC} + \dot{U}_{A'B'} - a\dot{U}_{B'C'}) = \\ &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{j60^\circ} + \dot{U}_{A'B'} + \dot{U}_{B'C'}e^{j60^\circ}) \end{aligned}$$

Таким образом, задача построения фильтра напряжения второй последовательности сводится к использованию четырёх напряжений (вместо шести фазных), которые должны быть повернуты на соответствующие углы, а затем геометрически сложены.

Аналогичными преобразованиями из линейных напряжений можно получить фильтры 1,2,4 и 5 составляющих:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j60^\circ} - \dot{U}_{A'B'} - \dot{U}_{B'C'}e^{-j60^\circ}); \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{j60^\circ} + \dot{U}_{A'B'} + \dot{U}_{B'C'}e^{j60^\circ}); \\ \dot{U}_4 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{A'B'} + \dot{U}_{B'C'}e^{-j60^\circ}); (6) \\ \dot{U}_5 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{j60^\circ} - \dot{U}_{A'B'} - \dot{U}_{B'C'}e^{j60^\circ}) \end{aligned}$$

Нулевую и третью составляющие выделить из линейных напряжений нельзя:

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A + \dot{U}_{C'} + \dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + \dot{U}_C + \dot{U}_{B'}) \\ \dot{U}_3 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A - \dot{U}_{C'} + \dot{U}_B - \dot{U}_{A'} + \dot{U}_C - \dot{U}_{B'}) \end{aligned} \quad (7)$$

Ориентация векторов токов нулевой и третьей последовательностей не зависит от угла θ сдвига между системами векторов фазных напряжений цепей, и поэтому угол θ не входит в уравнения для этих последовательностей.

Напряжение фильтра на вторичных зажимах находится в определённой зависимости от подведённых напряжений это одно из требований к фильтру симметричных составляющих. Должно выполняться условие

$$\dot{F}_p = \dot{k}_0\dot{F}_0 + \dot{k}_1\dot{F}_1 + \dot{k}_2\dot{F}_2 + \dot{k}_3\dot{F}_3 + \dot{k}_4\dot{F}_4 + \dot{k}_5\dot{F}_5 \quad (8)$$

где

$\dot{F}_0, \dot{F}_1, \dot{F}_2, \dot{F}_3, \dot{F}_4, \dot{F}_5$ - симметричные составляющие токов (напряжений);

Коэффициенты фильтра $\dot{k}_0, \dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3, \dot{k}_4, \dot{k}_5$, заданные комплексными или действительными значениями.

$$\dot{k}_{S\phi} = \dot{S}_6 \eta \quad (9)$$

η_{ϕ} - коэффициенты, характеризующие амплитудные и фазные изменения токов (напряжений), подводимых к фильтру.

III. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ В MATLAB & SIMULINK

Решение уравнений и матричной математической модели осуществлялась в

Matlab/Simulink. Одной из составных частей библиотеки SimPowerSystem пакета Matlab/Simulink является библиотека MathOperations. Она содержит функциональные блоки большинства математических преобразований. была создана Matlab-модель шестифазного фильтра, представленная на рисунок 3.

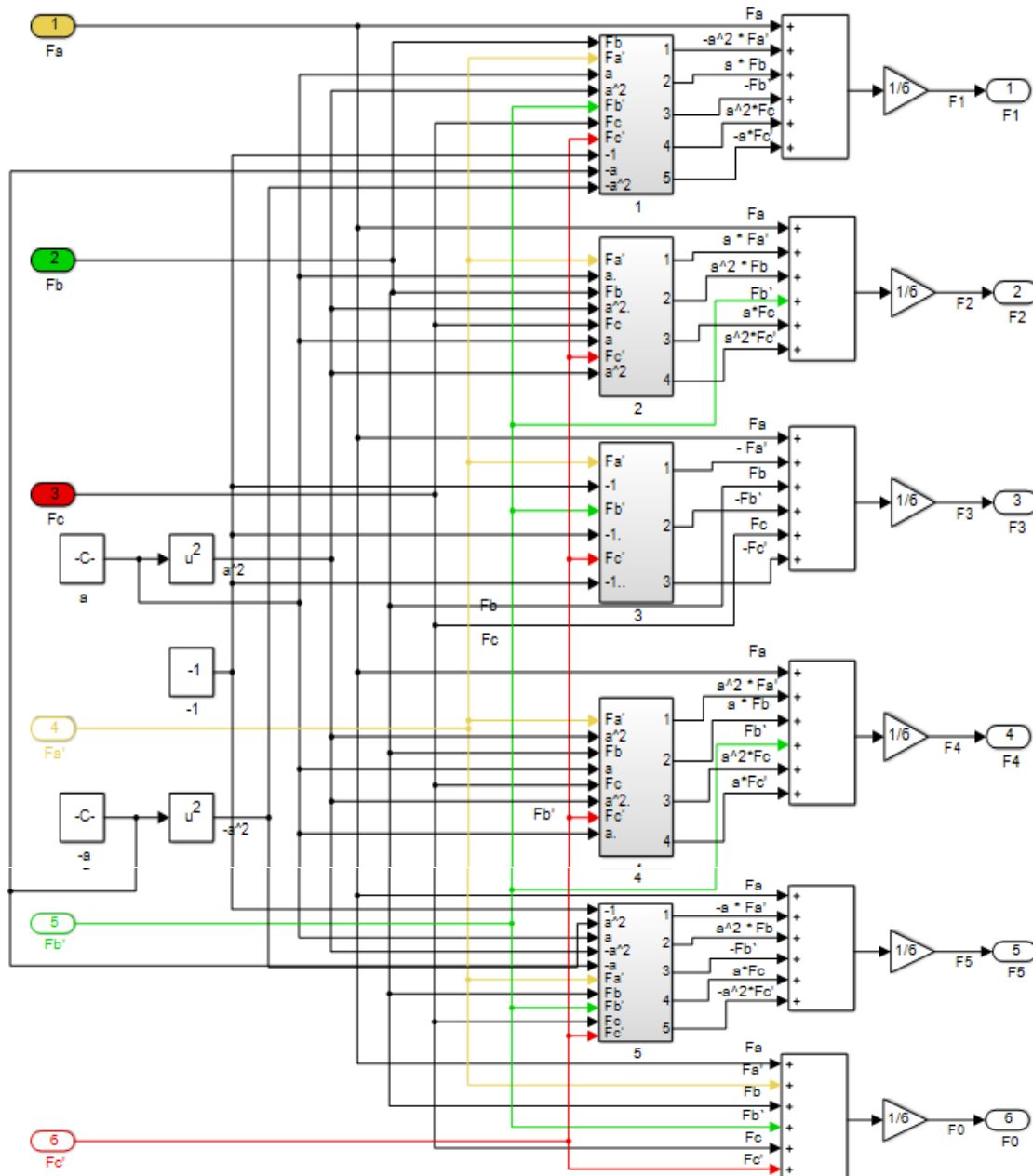


Рис. 3: Векторные диаграммы. а) несимметричная шестифазная система векторов б) вектора симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей; в) по фазное сложение векторов симметричных составляющих.

Для реализации методики модели фильтра в библиотеке MathOperations использованы следующие блоки с их функциональными возможностями:

- Блок Constant – задание значений постоянных, например, оператор системы $a=e^{j120}$;
- блок Math- общие математические функций;
- блок Product - выводит результат умножения двух входных данных, например, $a^2\dot{F}$; $-a^2\dot{F}$; $a\dot{F}$; $-a\dot{F}$ и т.д.
- Блок Sum - сложение или вычитание на своих входах.
- Блок Gain -умножает вход на постоянное значение (1/6).

Подсистемы 1,2,3,4 и 5 отвечают за обработку измерительной информации. Пример второй подсистемы представлен на рисунок 4.

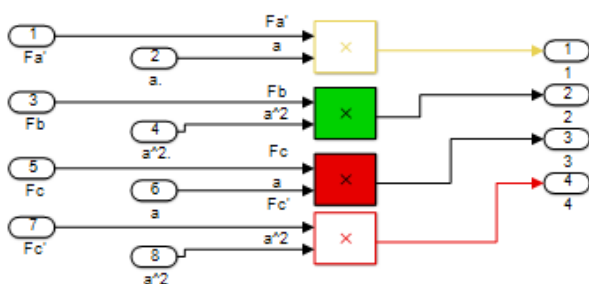


Рис.4. Подсистема расчёта составляющих .

Модуль Simulink (рис3.) вычисляет, исходя из заданных значений $\dot{F}_A, \dot{F}_{A'}, \dot{F}_B, \dot{F}_{B'}, \dot{F}_C, \dot{F}_{C'}$, симметричные составляющие $\dot{F}_0, \dot{F}_1, \dot{F}_2, \dot{F}_3, \dot{F}_4, \dot{F}_5$ по формуле (1). Matlab-модель может использоваться для анализа УСВЛ(СВЛ) при подключении к фильтра в любом из возможных режимах работы.

IV. Выводы

Любую несимметричную систему токов (напряжений) можно разложить на шесть симметричных составляющих. Определённым несимметриям присущи свои симметричные составляющие что, может послужить отличительным признаком определённой несимметрии. Представленные формулы соотношений между напряжениями, позволяет получить фильтры шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 и обнаружить на их основе любых комбинациях несимметричных коротких замыканий и обрывов фаз.

Исследование взаимосвязи фазных и симметричных составляющих, позволило построить в среде имитационного динамического моделирования MATLAB & Simulink их расчетную зависимость в виде фильтров соответствующих

симметричных составляющих. Реализована возможность автоматизированного расчета, что более чем на порядок уменьшило время работы с моделью при исследовании режимов работы УСВЛ (СВЛ).

Разработана обобщённая методика моделирования на компьютере фильтров шести симметричных составляющих, что позволяет рассчитать и определить электрические величины не только простых, но и сложных видов повреждений для создания эффективной релейной защиты необходимой чувствительности, реагирующая не на фазные величины, а на их симметричные составляющие.

REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

1. Веников В.А., Астахов Ю.Н., Постолатий В.М. Управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности. – Электричество, 1969, № 12, с. 7-11.
2. V.M. Postolati. Controllable flexible a.c. transmission systems. Conferința Națională a Energiei, CNE'98. Energia mîine. Reconcilierea eficienței și competitivității cu dezvoltarea durabilă. 14-18 iunie, 1998, Neptun - Olimp, România. Report Nr. 61
3. Alexandrov G.N., Astakhov Y.N., Venikov V.A. et al. Electric transmission lines of increased capacity and reduced ecological effect. – Paris, 1982.
4. L. A. Kojovic and J. F. Witte, "Improved protection systems using symmetrical components," 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294), Atlanta, GA, USA, 2001, pp. 47-52 vol.1, doi: 10.1109/TDC.2001.971207.
5. I. A. Rizvi and G. Reeser, "Using symmetrical components for internal external fault discrimination in differential protection schemes," 2013 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2013, pp. 68-79, doi: 10.1109/CPRE.2013.6822028.
6. Kiorsak M.V., Postolati V.M. Metod rascheta nesimmetrichnyh korotkih замыканий na dvuh-cepnyh liniyah jelektroperedachi so sblizhennymi fazami. «Informjenergo», 1984. (in Russian).
7. M. Chiorsac, Gh. Terte, V. Sidelnicov, L. Turcuman Metoda componentelor simetrice în calculul circuitelor polifazate. Conferința tehnico-științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților UTM, 19 noiembrie 2010, Chișinău
8. Kiorsak M., Turturica N. Methodology for Assessment the Possibility of Transfer Six-Phase Power Line into the Mode of Operation with Incomplete Number of Phases. Problemele Energeticii Regionale Nr. 1(45) / 2020
9. M.B. Киорсак, Ш. Фейгис, В.М. Постолатий. Определение электрических величин и

релейная защита УСВЛ. Монография. Кишинев,
Штиинца, 1988, 222 стр

10. Hidaia M. A. Simulation of Some Power Electronics Case Studies In Matlab Simpowersystem Toolbox.,2018-47
11. Perelmuter V. Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink and SimPowerSystems . CRC Press, 2012.
12. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих. – М., 1936. – 407 с.
13. Fortescue C.L. Method of symmetrical coordinates applied to solution pf poluphase network. "Transaction of AIEE", 1918, vol. 33, Pt. 11. References must in APA Style.