

ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С ТОКОПРОВОДАМИ ФАЗ ПО ВЕРШИНАМ ТРЕУГОЛЬНИКА

М.Я. КЛЕЦЕЛЬ, П.Н. МАЙШЕВ, М.Т. ТОКОМБАЕВ, А.Б. ЖАНТЛЕСОВА

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Предлагаются фильтры симметричных составляющих на катушках индуктивности (КИ), не нуждающиеся в трансформаторах тока. Определены координаты точек вблизи шин, в которых должны быть закреплены КИ. Получены аналитические выражения для расчетов параметров фильтров. Приведены доказательства их работоспособности.

Фильтры симметричных составляющих (ФСС) нашли широкое применение в релейной защите (РЗ) электроэнергетических систем. В связи с недостатками [1, 2] трансформаторов тока (ТТ), от которых получает информацию РЗ, уже несколько десятилетий рассматриваются вопросы, связанные с построением РЗ без ТТ с помощью магниточувствительных элементов [3-8]. Наиболее простыми и надежными из них являются герконы [8] и катушки индуктивности (КИ). Построение ФСС с помощью герконов (без управляющих обмоток) невозможно [7], а с КИ – для горизонтального расположения фаз электроустановок дано в [3], где каждая из симметричных составляющих выделяется с помощью соответствующих ей трех КИ. Для треугольного расположения фаз (например, промышленные токопроводы напряжением 6-110 кВ) этот вопрос, насколько нам известно, до сих пор не рассматривался, но по-прежнему актуален в связи с возможностью экономии материальных ресурсов за счет исключения ТТ (один ТТ на 10 кВ содержит около 2 кг меди и 10 кг высококачественной стали и с ростом напряжения эти цифры возрастают почти пропорционально).

В данной работе предлагается строить ФСС для электроустановок 6-35 кВ с треугольным расположением фаз на двух КИ (для 110 кВ – на трех), выделяя все симметричные составляющие с помощью одних и тех же КИ за счет их специального расположения вблизи токопроводов фаз. Разработанная схема ФСС представлена на рис. 1, где КИ 1, 2 и 3 закрепляются в вертикальной плоскости около шин электроустановки фаз *A*, *B* и *C* так, что продольная ось КИ 1 совпадает с биссектрисой угла между линиями, соединяющими фазу *A* с фазой *C* и фазу *C* с фазой *B*; продольная ось КИ 2 – с биссектрисой угла между линиями, соединяющими фазу *B* с фазой *A* и фазу *A* с фазой *C*; продольная ось КИ 3 перпендикулярна биссектрисе угла между линиями, соединяющими фазу *A* с фазой *C* и фазу *C* с фазой *B*, а ее центр тяжести удален от фазы *C* на расстояние $2d/\sqrt{3}$, где d – расстояние между токопроводами. Положение КИ определяется расстояниями x_1 , x_2 , x_3 от вертикали, проходящей через центр тяжести токопровода фазы *A*, до центров тяжести КИ 1, 2, 3, соответственно; расстояниями h_1 , h_2 , h_3 от горизонтали l , проходящей через центр тяжести токопровода фазы *C*,

до центров тяжести КИ 1, 2, 3; углами $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ между горизонталью l и продольными осями КИ 1, 2, 3. Обмотки КИ (рис.1) подключены к усилителям У1, У2, У3 (необходимы из-за малых величин наводимых в КИ электродвижущих сил (ЭДС)), выходы усилителей У1, У2 – к первичным обмоткам трансформаторов Тр1, Тр2. Реагирующие элементы РЭ1, РЭ2, фиксирующие появление токов прямой $I_{(1)}$ и обратной $I_{(2)}$ последовательностей, через соответствующие сопротивления $R2, R3, R4, R5$ и фазоповоротные схемы ФПС1, ФПС2 соединены с двумя парами вторичных обмоток Тр1, Тр2, а реагирующий элемент РЭ0, фиксирующий появление тока нулевой $I_{(0)}$ последовательности, соединен с выходом усилителя У3 через сопротивление $R1$. $R_{PЭ1}, R_{PЭ2}$ и $R_{PЭ0}$ – сопротивления соответствующих РЭ.

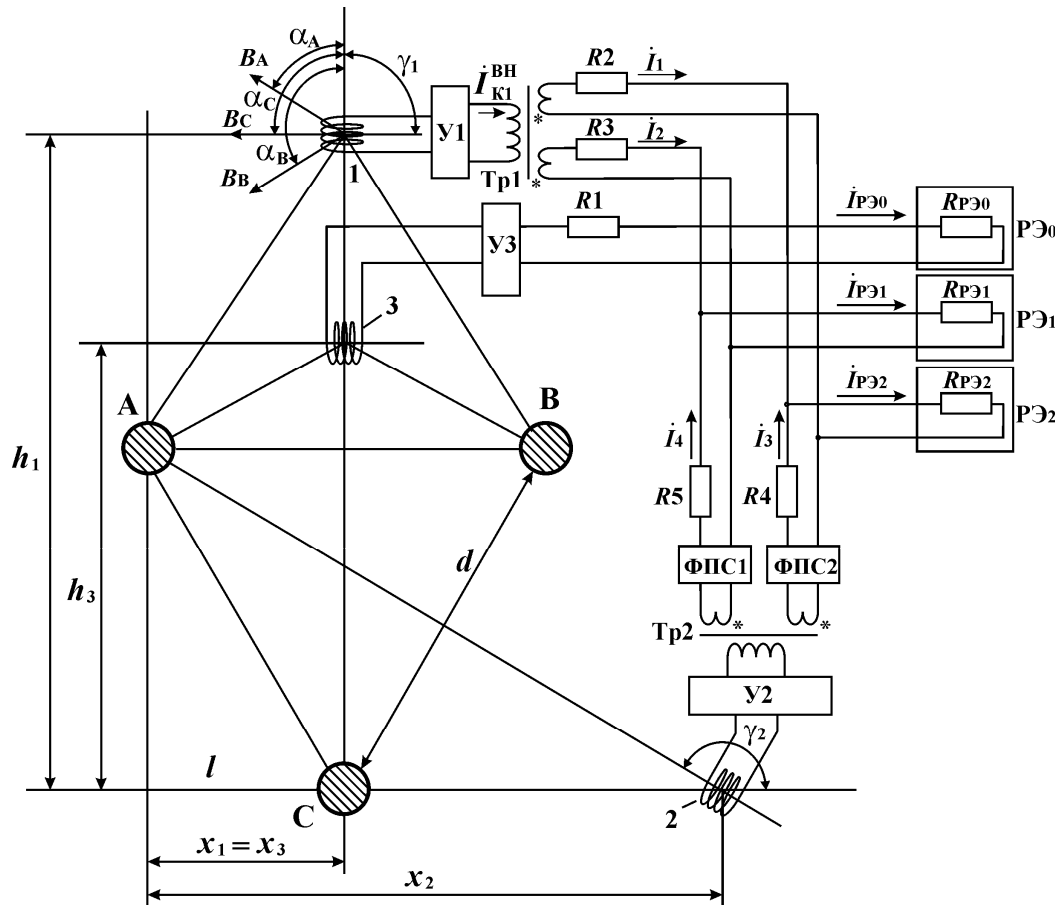


Рис. 1. Схема фильтров симметричных составляющих на катушках индуктивности для электроустановок с токопроводами фаз по вершинам треугольника

Для построения ФСС обычно используются комбинации токов, пропорциональных сумме или разности токов фаз [9]. Покажем, что получить такие комбинации можно, если в КИ 1, 2 и 3 индуцируются, соответственно, ЭДС:

$$\dot{E}^{K1} = K_1' \cdot (i_A - i_B),$$

$$\dot{E}^{K2} = K_2' \cdot (i_B - i_C) \text{ и } \dot{E}^{K3} = K_3' \cdot (i_A + i_B + i_C),$$

где K_1^l, K_2^l, K_3^l - коэффициенты пропорциональности.

Как известно, ЭДС на концах обмотки КИ создается индукцией $B_{\text{ПР}}$ магнитного поля (МП), действующей вдоль ее продольной оси.

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа в данном случае для КИ 1 (аналогично записываются формулы и для КИ 2, 3)

$$\begin{aligned} \dot{B}_{\text{ПР}}^{\text{K1}} &= \dot{B}_A \cos \alpha_A + \dot{B}_B \cos \alpha_B + \dot{B}_C \cos \alpha_C = \\ &= \mu_0 (g_A \cdot \dot{I}_A + g_B \cdot \dot{I}_B + g_C \cdot \dot{I}_C) / 2\pi, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{B}_A, \dot{B}_B, \dot{B}_C$ - индукции МП в точке расположения центра тяжести КИ 1, созданных токами фаз A, B, C ; $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ - углы между продольной осью КИ 1 и $\dot{B}_A, \dot{B}_B, \dot{B}_C$, соответственно; $\dot{I}_A$ ($\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$) - ток в фазе A (B и C); μ_0 - магнитная проницаемость воздуха; g_A (g_B и g_C) - коэффициенты, характеризующие влияние тока фазы A (B и C) на КИ 1, например,

$$g_A^{\text{K1}} = \frac{x_1 \sin \gamma_1 - (h_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}d) \cos \gamma_1}{(h_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}d)^2 + x_1^2}, \quad g_C^{\text{K1}} = \frac{(x_1 - \frac{d}{2}) \sin \gamma_1 - h_1 \cos \gamma_1}{(x_1 - \frac{d}{2})^2 + h_1^2}.$$

Из выражения (1) следует: чтобы на КИ 1, 2 и 3 действовало МП, пропорциональное разности токов фаз A и B , разности токов фаз B и C и сумме токов фаз A, B и C , необходимо выполнение следующих условий:

$$\text{для КИ 1 } g_A^{\text{K1}} = -g_B^{\text{K1}}, g_C^{\text{K1}} = 0; \quad (2)$$

$$\text{для КИ 2 } g_B^{\text{K2}} = -g_C^{\text{K2}}, g_A^{\text{K2}} = 0;$$

$$\text{для КИ 3 } g_A^{\text{K3}} = g_B^{\text{K3}} = g_C^{\text{K3}}.$$

Тогда для КИ 1 имеем

$$\dot{B}_{\text{ПР}}^{\text{K1}} = \mu_0 g_A^{\text{K1}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) / 2\pi. \quad (3)$$

Поток вектора магнитной индукции $\dot{B}_{\text{ПР}}^{\text{K1}}$ через площадь S_1 поперечного сечения КИ 1 есть магнитный поток $\Phi_{\text{K1}} = \int_{S_1} \dot{B}_{\text{ПР}}^{\text{K1}} dS$. В КИ 1 поток Φ_{K1}

наводит ЭДС $\dot{E}^{\text{K1}}$, сдвинутую на угол $\pi/2$ относительно Φ_{K1} :

$$\dot{E}^{\text{K1}} = \dot{K}_1 \cdot g_A^{\text{K1}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B), \quad (4)$$

где $\dot{K}_1 = \mu_0 \cdot W_1 \cdot f \cdot S_1 \cdot e^{-j90^\circ}$; W_1 - количество витков КИ 1; f - частота промышленного тока.

$\dot{E}^{K1}$ усиливается усилителем У1 и на выходе Тр1 создает токи $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ (рис. 1), которые могут регулироваться по амплитуде изменением коэффициента K_{Y1} усиления усилителя У1 и соответствующими резисторами:

$$\dot{I}_1 = \dot{E}^{K1} K_{Y1} / (R_2 + R_{PЭ2}), \quad (5)$$

где $(R_2 + R_{PЭ2})$ – сопротивление выходной цепи трансформатора Тр1, состоящее из сопротивления R_2 , включающего в себя добавочное сопротивление, сопротивление соединительных проводов и вторичной обмотки трансформатора Тр1, и сопротивления $R_{PЭ2}$ реагирующего элемента. Также определяются токи $\dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_{PЭ0}$ и показывается их пропорциональность разностям и сумме токов соответствующих фаз. Аналогично (4), ЭДС, индуцируемые в КИ 2 и 3 равны (для упрощения расчетов и изготовления параметры обмоток КИ приняты одинаковыми)

$$\dot{E}^{K2} = \dot{K}_1 \cdot g_B^{K2} (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \text{ и } \dot{E}^{K3} = \dot{K}_1 \cdot g_B^{K3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \quad (6)$$

Координаты установки КИ 1, обеспечивающие (4) и (5), находим, рассматривая соответствующие равенства в (2) как систему уравнений относительно x_1, h_1 и γ_1 . Например, для электроустановки 35 кВ (по [10] $d=1,01$ м) $x_1 = 0,505$ м, $h_1 = 1,75$ м, $\gamma_1 = 90^\circ$. Отметим, что каждая система уравнений в (2) имеет множество решений, поскольку содержит три неизвестных и одну из координат можно выбирать исходя из соображений удобства расположения КИ. Аналогично находятся координаты для КИ 2 и 3.

Как показал анализ схемы, для более простой отстройки фильтров необходимо равенство напряжений на вторичных обмотках трансформаторов Тр1, Тр2. Для этого требуется, чтобы количество витков их первичных и вторичных обмоток было одинаковым, а также выполнялось равенство

$$K_{Y2} = K_{Y1} \frac{g_A^{K1}}{g_B^{K2}},$$

где K_{Y1} и K_{Y2} – коэффициенты усиления первого и второго усилителей соответственно (коэффициент K_{Y3} усиления третьего усилителя выбирается в зависимости от чувствительности реагирующего элемента РЭ0).

Соотношения токов, протекающих по вторичным обмоткам, обусловлены мощностью, передаваемой через трансформаторы, то есть

$$\dot{E}^{K1} K_{Y1} \dot{I}_1 + \dot{E}^{K1} K_{Y1} \dot{I}_2 = \dot{E}^{K1} K_{Y1} \dot{I}_{K1}^{ВН},$$

где $\dot{I}_{K1}^{ВН}$ – ток в первичной обмотке Тр1.

Аналогично – для трансформатора Тр2.

Легко видеть, что усилитель У3, резистор $R1$, реагирующий элемент РЭ0 образуют фильтр тока нулевой последовательности (он представляет интерес

только для электроустановок 110 кВ). Действительно, учитывая (6), ЭДС $\dot{E}^{K3}$ создает в РЭ₀ ток

$$\dot{I}_{РЭ0} = \frac{K_{Y3} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K3}}{R_1 + R_{РЭ0}} \cdot (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{K_{Y3} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K3}}{R_1 + R_{РЭ0}} \cdot 3\dot{I}_{(0)},$$

то есть $\dot{I}_{РЭ0}$ пропорционален току $3\dot{I}_{(0)}$ нулевой последовательности.

Согласно [9], ток обратной последовательности можно представить как

$$3\dot{I}_{(2)A} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) + (\dot{I}_B - \dot{I}_C)e^{-j60^\circ}. \quad (7)$$

Покажем, что в РЭ₂ протекает ток, пропорциональный $3\dot{I}_{(2)A}$. Согласно выражению (5), в КИ 1 наводится ЭДС $\dot{E}^{K1}$, которая усиливается усилителем У1 и создает токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ на вторичных обмотках трансформатора Тр1:

$$\dot{I}_1 = \frac{K_{Y1} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K1}}{R_2 + R_{РЭ2}} \cdot (\dot{I}_A - \dot{I}_C); \dot{I}_2 = \frac{K_{Y1} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K1}}{R_3 + R_{РЭ1}} \cdot (\dot{I}_A - \dot{I}_B). \quad (8)$$

Ток $\dot{I}_3$ ($\dot{I}_4$) определяется аналогично $\dot{I}_1$ ($\dot{I}_2$) с дальнейшим поворотом фазы тока в ФПС2 (ФПС1) на -60° (60°):

$$\dot{I}_3 = \frac{K_{Y1} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K1}}{R_4 + R_{РЭ2}} \cdot (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \cdot e^{-j60^\circ}. \quad (9)$$

В режимах, когда токи в фазах электроустановки симметричны, в РЭ₂ ток должен отсутствовать. Поэтому необходимо, чтобы $\dot{I}_1 = \dot{I}_3$ (рис. 1). Как видно из сравнения (8) и (9), $\dot{I}_1 = \dot{I}_3$, если $R_2 = R_4$. Учитывая это условие и (7), (8), (9), после элементарных подстановок получаем ток в РЭ₂:

$$\dot{I}_{РЭ2} = \dot{I}_1 + \dot{I}_3 = \frac{K_{Y1} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K1}}{R_2 + R_{РЭ2}} \cdot 3\dot{I}_{(2)A} \quad (10)$$

Для определения влияния токов прямой, обратной и нулевой последовательностей на величину тока $\dot{I}_{РЭ2}$ находится его значение при поочередном питании фильтра каждой составляющей. При питании фильтра токами нулевой последовательности ($\dot{I}_{(0)A} = \dot{I}_{(0)B} = \dot{I}_{(0)C}$ [11]) $\dot{I}_{РЭ2} = 0$, что следует из выражений (8), (9), если подставить эти токи вместо $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$. Аналогично, $\dot{I}_{РЭ2} = 0$ для токов прямой последовательности, так как $\dot{I}_{(1)A} = \dot{I}_1 e^{j0^\circ}$, $\dot{I}_{(1)B} = \dot{I}_1 e^{j120^\circ}$, $\dot{I}_{(1)C} = \dot{I}_1 e^{j240^\circ}$. Для токов обратной последовательности $\dot{I}_{(2)A} = \dot{I}_2 e^{j0^\circ}$, $\dot{I}_{(2)B} = \dot{I}_2 e^{-j120^\circ}$, $\dot{I}_{(2)C} = \dot{I}_2 e^{-j240^\circ}$ и

$$i_{PЭ2} = \frac{K_{У1} \cdot \dot{K}_1 \cdot g_A^{K1}}{R_2 + R_{PЭ2}} \cdot \left(\sqrt{3} I_{(2)A} e^{-j30^\circ} + \sqrt{3} I_{(2)A} e^{j30^\circ} \right) = \dot{K}_{ПР} \cdot 3 I_{(2)A},$$

где $\dot{K}_{ПР}$ - коэффициент пропорциональности.

Следовательно, через РЭ₂ проходит только ток $I_{(2)A}$, и часть схемы, подключенная к РЭ₂, является фильтром тока обратной последовательности. Аналогично доказывается, что часть схемы с РЭ₁ является фильтром тока прямой последовательности.

Выводы

Разработанные фильтры симметричных составляющих (ФСС) дают возможность не использовать трансформаторы тока при выполнении релейной защиты на ФСС для электроустановок с треугольным расположением фаз. Предложенная методология построения фильтров позволила свести количество необходимых для их выполнения катушек индуктивности к двум при напряжении упомянутых электроустановок 6-35 кВ и к трем при 110 кВ.

Summary

It is offered filters symmetrical forming on spool of the inductances (SI), not needing for transformer of the current. It is given coordinates point near buses of electrodevice, in which SI must be bolted. Analytical expressions are received for calculation filter's parameters. Brought proof to their capacity to work.

Литература

1. Релейная защита электрических систем / А.М. Федосеев. – М.: Энергия, 1976.
2. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.А. Андреев. – М.: Высш. школа, 2006.
3. Сирота И.М., Шурин В.М. Фильтры симметричных составляющих в цепях с дистанционными датчиками // Электричество. – 1971. – №11. – С.26-31.
4. Меерович Э.А., Назаров Л.А., Карабаев Г.Х., Кокуркин Б.П. Измерение токов линий высшего напряжения по его магнитным полям // Электричество. – 1980. – №7. – С.32-40.
5. Измерительные преобразователи тока в релейной защите / В.Е. Казанский – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Опыт разработки преобразователей тока в напряжение на магнитотранзисторах для устройств релейной защиты и измерения / В.Н. Гречухин, В.Н. Нуждин, В.В. Глускина и др. // Энергетик. – 1997. – №6. – С.14-16.
7. Клецель М.Я., Мусин В.В. О построении на герконах защит высоковольтных установок без трансформаторов тока // Электротехника. – 1987. – №4. – С.11-13.
8. Клецель М.Я., Мусин В.В., Алишев Ж.Р., Мануковский А.В. Свойства герконов, применяемых в релейной защите // Электричество. – 1993. – №9. – С.18-21.
9. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Токопроводы промышленных предприятий / А.М. Семчинов. – Л.: Энергия, 1972.

© Проблемы энергетики, 2008, № 3-4

11. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1986.

Поступила 18.12.2007