



Ахметшин Р. С.
Ahmetshin R. S.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроэнергетика
и электротехника»,
Набережночелнинский институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»,
г. Набережные Челны,
Российская Федерация*



Пичугин П. И.
Pichugin P. I.

*магистрант кафедры «Техника
и электрофизика высоких напряжений»,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 621.318

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-48-55

ВЛИЯНИЕ ВЗАМОИНДУКЦИИ В НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ РАБОТЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В статье рассмотрен эффект взаимодействия магнитных полей двух и более проводников с токами в части увеличения (уменьшения) их результирующего индуктивного сопротивления, которое существенным образом влияет на функционирование того или иного электрического оборудования. В качестве такового были рассмотрены провода линий электропередачи, из-за многожильности которых возникает негативное для данного объекта явление взаимоиנדукции; заземлители в заземляющем устройстве подстанции, сопротивление которых является важным параметром и также зависит от данного явления. В качестве объектов, где наблюдается положительный эффект от явления взаимоиנדукции, были рассмотрены токоограничивающие реакторы и трансформаторы с расщеплённой обмоткой. Обозначены параметры и предложены технические решения, изменение и применение которых соответственно позволяют использовать данный эффект для энергоэффективного использования электротехнического оборудования и электрических сетей. Также приводятся возможности перспективных конструктивных изменений, уменьшающие проявление взаимоиנדукции в случае её негативного влияния. Утверждения о пользе или вреде явления были подтверждены аналитическими расчётами. В результате установлено, что применение полого единого провода для линий электропередачи позволит снизить его индуктивное сопротивление по сравнению с многожильным. На примере двух заземлителей показано, какой экономии стали можно добиться при их оптимальном расположении с сохранением результирующего сопротивления. На примере работы токоограничивающих реакторов был предложен способ, позволяющий увеличить токоограничивающий эффект посредством определённого расположения обмотки фазы реактора, при котором от явления взаимоиנדукции будет наблюдаться положительный эффект.

Ключевые слова: магнитный поток, взаимная индукция, собственная индуктивность, индуктивное сопротивление, провода, заземлители, токоограничивающие реакторы, электрические потери, трёхфазные ЛЭП, заземляющее устройство.

MUTUAL INDUCTION INFLUENCE ON SPECIFIC TERMS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL CIRCUITS USE AND OPERATION

This article points to the different effect of the interaction of the magnetic fields of two or more conductors with currents in terms of increasing (decreasing) their final inductive reactance, which affects the functioning of a particular piece of electrical equipment significantly. As such, power line wires were considered, the multicore nature of which causes a mutual induction phenomenon, negative for this object, grounding conductors in the switching station's grounding device, the resistance of which is an important parameter and is also dependent on this phenomenon. Current-limiting reactors and split-winding transformers were selected as objects, which benefit from the mutual induction phenomenon. The parameters and technical solutions, the change and application of which will respectively allow using this effect for the energy-efficient use of electrical equipment and electrical circuits, have been indicated and proposed. The possibilities for advanced structural changes, that reduce the manifestation of mutual induction in case of its negative influence, are also introduced. Assumptions about the benefits or harms of the phenomenon have been backed by analytical calculations. As a result, it has been discovered, that the application of a single hollow wire for power lines will reduce its inductive reactance compared to a multi-core wire. Application of two grounding devices as an example showed how much steel could be saved, if they are optimally located, while maintaining the resulting resistance. Using the operation of current-limiting reactors as an example, a method, allowing to increase the current-limiting effect by means of a specific arrangement of the reactor phase winding, in which the phenomenon of mutual induction will have a positive effect, was proposed.

Key words: magnetic flux, mutual induction, self-inductance, inductive reactance, wires, grounding, current-limiting reactors, electric losses, three-phase power transmission lines, grounding device.

Введение

В теоретических основах электротехники имеются понятия «поток самоиндукции», «взаимная индукция» и «взаимная индуктивность» двух контуров с током, которые иллюстрируются на рисунке 1.

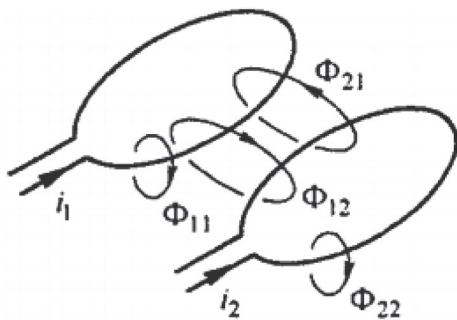


Рисунок 1. Потокосцепления двух контуров с током

При протекании тока i_1 в первом контуре и тока i_2 во втором контуре первым контуром создаётся магнитный поток Φ_1 , часть которого Φ_{11} пронизывает только первый контур, а другая часть Φ_{12} замыкается через второй контур (рисунок 1). Тогда поток Φ_{11} называется потоком самоиндукции, а поток Φ_{12} , сцепляющийся со вторым контуром и определя-

емый током в первом контуре, называется потоком взаимной индукции [1]. Аналогичны рассуждения и для второго контура.

Коэффициент пропорциональности между потоком взаимной индукции Φ_{12} и током i_1 в первом контуре называется взаимной индуктивностью M двух контуров, она зависит от взаимного расположения, геометрических размеров контуров и от магнитной проницаемости среды [2]. Математически данная зависимость выражается следующим образом:

$$M = \frac{\Phi_{12}}{i_1} = \frac{\Phi_{21}}{i_2}.$$

Если изменяется поток взаимной индукции Φ_{12} , сцепляющийся со вторым контуром, то в этом контуре наводится электродвижущая сила (ЭДС) e_{2M} . Достичь её возникновения можно изменением либо тока i_1 в первом контуре, либо изменением взаимной индуктивности M . В данной статье рассматривается только первый случай. Описанное явление называется явлением взаимной индукции, а упомянутая ЭДС называется ЭДС взаимной индукции.

В соответствии с принципом электромагнитной инерции Ленца возникающие ЭДС

стремятся препятствовать всякому изменению потока, сцепляющемуся с контурами. Иными словами, при возрастании (убывании) потока через контур наведённая в нём ЭДС стремится вызвать ток такого направления, чтобы создаваемый им магнитный поток препятствовал соответствующему изменению потока взаимной индукции:

$$e_{2M} = -M \frac{di_1}{dt}.$$

Данная закономерность верна и для двух проводников, поскольку контур можно представить как совокупность трубок тока.

Явление взаимной индукции играет огромную роль в электроэнергетике и электротехнике. Ярким примером этого являются трансформаторы, действие которых основано на явлении взаимной индукции, благодаря которому происходит наведение ЭДС во вторичной обмотке при изменении тока в первичной обмотке и, следовательно, передача энергии из первичной цепи во вторичную. Несмотря на то, что явление взаимной индукции находит полезное применение в различных аппаратах и машинах, иногда оно может быть крайне нежелательным. Например, при близком расположении с линией электропередачи (ЛЭП) линии связи в последней наблюдается наведение ЭДС взаимной индукции, приводящее к помехам в работе линии связи [3].

Целью данной статьи является оценка степени положительного или негативного влияния явления взаимной индукции в некоторых практических задачах электроэнергетики, анализ возможных сфер полезного использования явления, а также методов борьбы с ним при негативном эффекте.

Многожильность проводов для передачи электроэнергии

Наибольшее распространение на воздушных линиях (ВЛ) получили неизолированные сталеалюминиевые провода. Стальной сердечник служит для обеспечения необходимой механической прочности, а токопроводящей частью является алюминий. Проводимость стального сердечника не учитывается, как и поверхностный эффект, которым при промышленной частоте 50 Гц можно пренебречь вследствие значительной толщины проникновения тока в проводник. Как традиционные, широко применяемые сталеалюминие-

вые провода марок АС, АСКС, АСКП и АСК, так и инновационные с алюминиевыми сплавами или компактные профилированные провода являются многопроволочными, то есть поверх стального сердечника располагаются алюминиевые проволоки, скрученные или уложенные определённым образом.

Заметим, что каждая жила оказывает магнитное влияние вследствие явления взаимной индукции, что приводит к возникновению в каждой жиле противодействующей электродвижущей силы, эффект от которой аналогичен повышению индуктивного сопротивления жилы. С другой стороны, в отношении протекания тока многожильность провода означает параллельное соединение токопроводящих жил в схеме замещения и уменьшение результирующего сопротивления всего провода. Отсюда возникает необходимость сравнения индуктивных сопротивлений многожильных проводов и проводов, токопроводящая часть которых была бы представлена полым цилиндром вместо набора жил.

Выполним соответствующую оценку на конкретном примере, взяв для расчётов сталеалюминиевый провод АС 70/11 длиной $l=1$ м, состоящий из $n=6$ алюминиевых проволок диаметром $d_0=3,8$ мм, симметрично расположенных вокруг стального сердечника диаметром $d_{\text{серд}}=3,8$ мм (рисунок 2).

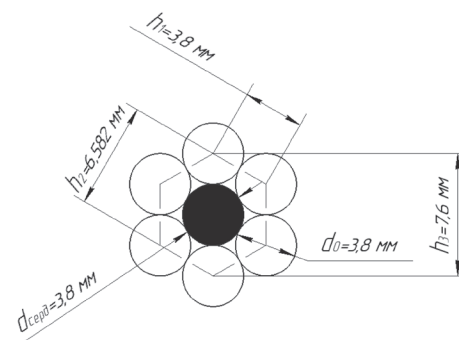


Рисунок 2. Расчётная модель провода АС 70/11

Каждая жила обладает внешней $L_{\text{внеш}}$ и внутренней $L_{\text{внут}}$ индуктивностями (суммарно собственная индуктивность L), а также магнитно связана с двумя соседними жилами с коэффициентом взаимной индукции M_1 , с двумя жилами по другую сторону от соседних с коэффициентом взаимной индукции M_2 , а также с одной дальней противоположной жилой с коэффициентом взаимной индукции M_3 .

Поскольку в каждой жиле ток имеет одинаковое направление, то её можно представить на схеме замещения собственной индуктивностью L и тремя вышеперечисленными индуктивностями M_i ($i=1, 2, 3$), которые вносятся со знаком «+» и привносят жиле дополнительное индуктивное сопротивление.

В силу симметрии проводника каждая жила находится в равных условиях, а потому обладает одним и тем же индуктивным сопротивлением X_0 .

Поскольку ток растекается по жилам равномерно, то результирующее сопротивление всего провода X_1 находится как параллельное соединение жил:

$$X = \frac{X_0}{n}. \quad (1)$$

Индуктивное сопротивление одной жилы X_0 можно найти по следующей формуле:

$$X_0 = 2\pi f(L + 2M_1 + 2M_2 + M_3), \quad (2)$$

где f — частота тока, протекающего по жиле, $f=50$ Гц;

Далее используем расчётные формулы из [4]. Собственная индуктивность L одиночного прямолинейного провода круглого сечения находится по следующей формуле (внутренняя индуктивность материала жилы учтена в ней):

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right), \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная (относительная магнитная проницаемость алюминия с большой степенью точности равна 1), $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

r — радиус поперечного сечения жилы, $r=d_0/2=1,9$ мм.

Взаимная индуктивность двух прямолинейных проводов круглого сечения M находится по формуле:

$$M_i = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{h_i} - 1 \right), \quad (4)$$

где h_i — расстояние между проводами (центрами).

Данная формула справедлива при условии $h \ll l$, что имеет место в дальнейших расчётах.

Из рисунка 2 определяем расстояния между жилами для нахождения трёх вышеупомянутых взаимных индуктивностей. Расстояние h_2 находим как основание равно-

стороннего треугольника с углом при нём 30° в правильном шестиугольнике, который образуется при соединении центров жил:

$$h_1 = 2r = d_0 = 3,8 \text{ мм};$$

$$h_2 = 2 \cdot 2r \cdot \cos(30^\circ) = 2d_0 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot 3,8 = 6,582 \text{ мм};$$

$$h_3 = 2r + d_{\text{серд}} = 2d_0 = 7,6 \text{ мм}.$$

Тогда индуктивное сопротивление одной жилы X_0 по формуле (2) равно:

$$\begin{aligned} X_0 &= 2\pi f(L + 2M_1 + 2M_2 + M_3) = \\ &= \frac{2\pi f \mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} + 2 \ln \frac{2l}{h_1} - 2 + 2 \ln \frac{2l}{h_2} - 2 + \ln \frac{2l}{h_3} - 1 \right) = \\ &= \mu_0 f l \left(\ln \frac{4l^2}{r h_3} + 2 \ln \frac{4l^2}{h_1 h_2} - \frac{23}{4} \right) = \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1 \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot 1000^2}{1,9 \cdot 7,6} + \right. \\ &\quad \left. + 2 \ln \frac{4 \cdot 1000^3}{3,8 \cdot 6,582} - \frac{23}{4} \right) = 1,932 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Результирующее сопротивление всего провода X_1 по формуле (1) равно:

$$X_1 = \frac{X_0}{n} = \frac{1,932 \cdot 10^{-3}}{6} = 3,22 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Теперь подсчитаем индуктивное сопротивление X_2 полого прямолинейного провода длиной $l=1$ м кругового сечения, в котором набор жил заменён цельным алюминием. Сначала рассчитаем собственную индуктивность L для цельного полого провода:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{rc} - 1 \right), \quad (5)$$

где r — внешний радиус провода, $r=d_0+d_{\text{серд}}/2=5,7$ мм;

c — величина, значение которой берётся в таблице [4] в зависимости от отношения внутреннего радиуса полости к внешнему радиусу.

В нашем случае отношение внутреннего радиуса полости к внешнему (рисунок 3) равно 0,333. По таблице [4] интерполяцией определяем, что $c=0,8153$.

Индуктивность L для цельного полого провода по формуле (5) равна:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2\pi} \left(\ln \frac{2000}{5,7 \cdot 0,8153} - 1 \right) = 1,0129 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление X_2 полого прямолинейного провода:

$$X_2 = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,0129 \cdot 10^{-6} = 3,182 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Отсюда видно, что индуктивное сопротивление многожильного провода больше индуктивного сопротивления такой же геометрии полого провода, разница в процентах составляет:

$$\Delta = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \cdot 100\% = \frac{3,22 \cdot 10^{-4} - 3,182 \cdot 10^{-4}}{3,22 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\% = 1,18\%.$$

Можно сделать вывод, что повышение сопротивления от влияния взаимной индукции не полностью компенсируется параллельным соединением жил в проводе. Превышение сопротивления хотя и не является значительным, но всё же обуславливает некоторые потери мощности при передаче мощности в линиях электропередачи. В связи с этим имеет смысл рассмотреть возможность эксплуатации трубчатого провода в ЛЭП. Помимо негативного влияния взаимной индукции между жилами многожильные провода имеют недостаток, заключающийся в том, что при повреждении одной из жил соседние жилы стремятся вытолкнуть её вследствие клинового эффекта (например для трапециевидного профиля) [5]. Очевидно, что полые провода лишены такого минуса.

Дополнительно выведем формулу для погонной индуктивности полого провода в трёхфазной сети в расчёте на одну фазу. Из [6] находим, что эквивалентная индуктивность одного провода L' в трёхфазной линии при симметричном режиме токов равна:

$$L' = L - M, \quad (6)$$

где L — собственная индуктивность полого провода по формуле (5);

M — взаимная индуктивность между параллельными проводами длиной l с расстоянием между осями D при $l \gg D$:

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{D} - 1 \right).$$

Под расстоянием D понимают среднегеометрическое расстояние между проводами трёхфазной системы. Примем для расчёта номинальное напряжение 110 кВ, которому

соответствует среднегеометрическое расстояние $D=5$ м.

Тогда эквивалентная индуктивность одного провода L' по формуле (6) равна:

$$L' = L - M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{D} - 1 \right) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D}{rc}.$$

Тогда формула для погонной индуктивности полого провода имеет вид:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{rc}.$$

Рассчитаем погонное сопротивление X такого провода на $l=1$ км длины:

$$X = 2\pi fL' = 2\pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \times \ln \frac{5000}{5,7 \cdot 0,8153} = 0,439 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}.$$

В справочных данных [7] для провода АС 70/11 даётся значение погонной индуктивности 0,444 Ом/км, что на 1,14 % больше рассчитанного значения для полого провода.

Влияние друг на друга вертикальных заземлителей в заземляющем устройстве подстанции

Более существенное негативное влияние явления взаимной индукции наблюдается в заземляющих устройствах, служащих для защиты людей и животных от напряжения прикосновения. Поскольку направление тока в заземляющих электродах при коротком замыкании одинаковое, то происходит наведение противодействующих ЭДС в каждом из электродов от соседнего, что ведёт к повышению их сопротивления и ухудшению растекания тока. Степень влияния электродов друг на друга характеризуется коэффициентом использования η , который приводится в справочных таблицах.

Практически проблема состоит в необходимости обеспечить нормируемое ПУЭ результирующее сопротивление заземляющего устройства, добиться которого зачастую приходится посредством неоправданно большой тратой материала заземлителей (в основном сталь).

На примере двух вертикальных стальных электродов круглого сечения проведём расчёт, ставящий целью выяснить, как можно

добиться уменьшения расхода стали при сохранении необходимого значения сопротивления заземляющего устройства (рисунок 3).

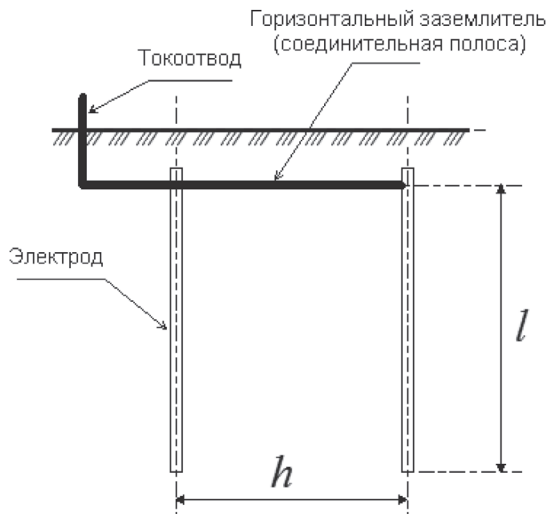


Рисунок 3. Конфигурация заземляющего устройства

Дальнейшие формулы для расчёта взяты из [8]. Сопротивление группы вертикальных электродов R_B находится по формуле:

$$R_B = \frac{r_B}{\eta_B n}, \quad (7)$$

где r_B — сопротивление одного вертикального электрода, Ом;

η_B — коэффициент использования группы вертикальных электродов;

n — число электродов. В расчёте $n=2$.

Сопротивление одного вертикального электрода r_B находится следующим образом:

$$r_B = \frac{0,366\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (8)$$

где ρ — удельное сопротивление земли. Принимаем в качестве почвы чернозём, $\rho=50$ Ом·м;

l — длина электрода, $l=5$ м;

d — внешний диаметр электрода, принимаем $d=16$ мм;

t — глубина заложения электрода, примем $t=3,2$ м.

Для начала подсчитаем результирующее сопротивление данной пары электродов R_B , находящихся на расстоянии $h=l=5$ м друг от друга. По таблице [8] определяем, что коэффициент использования для двух вертикальных электродов и $h/l=1$ равен $\eta_B=0,84$.

Сопротивление одного вертикального электрода r_B по формуле (8):

$$\begin{aligned} r_B &= \frac{0,366\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= \frac{0,366 \cdot 50}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{16 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = \\ &= 10,889 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Сопротивление данной пары электродов R_B по формуле (7):

$$R_B = \frac{r_B}{\eta_B n} = \frac{10,889}{0,84 \cdot 2} = 6,482 \text{ Ом.}$$

Из формулы для взаимной индуктивности двух прямолинейных проводников следует, что уменьшить взаимную индуктивность M (повысив коэффициент использования) можно уменьшением длины электрода l или увеличением расстояния h между ними. Анализируя формулу для сопротивления одиночного электрода, делаем вывод, что увеличение длины электрода приведёт к увеличению его сопротивления.

Единственным вариантом остаётся увеличение расстояния h между электродами. Теперь расположим второй электрод дальше от первого так, чтобы выполнялось равенство $h/l=2$. Для этого отношения новый коэффициент использования $\eta_{B1}=0,91$. Поскольку мы условились сохранить значение сопротивления R_B постоянным, то за счёт увеличения коэффициента использования можно увеличить сопротивление одиночного электрода r_B . Уменьшим диаметр d электрода, тем самым снизив количество стали, идущее на изготовление электрода.

Новое сопротивление одиночного электрода r_B :

$$r_B = \eta_{B1} n R_B = 0,91 \cdot 2 \cdot 6,482 = 11,797 \text{ Ом.}$$

Получаем уравнение:

$$\begin{aligned} r_B &= \frac{0,366\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= \frac{0,366 \cdot 50}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{d \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 11,797 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Решая уравнение, находим новый диаметр электрода $d_0=9,04$ мм.

Представляя стальной электрод как цилиндр, найдём приблизительно экономию стали по массе для двух электродов Δm :

$$\Delta m = 2\gamma\pi \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_0^2}{4} \right) l,$$

где γ — плотность стали, $\gamma=7800$ кг/м³.

Экономия стали составит:

$$\Delta m = 2\gamma\pi \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_0^2}{4} \right) l = 2 \cdot 7800 \cdot \pi \times \\ \times \left(\frac{(16 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(9,04 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 5 = 10,68 \text{ кг.}$$

Заметим, что экономия стали по массе составляет 68 % от суммарной массы двух электродов первоначального диаметра и расположенных друг к другу ближе на длину электрода.

Отсюда делаем вывод о высокой эффективности более дальнего расположения электродов (при позволении условий местности) и попутного уменьшения диаметра электродов.

Явление взаимовлияния в сдвоенных токоограничивающих реакторах и трансформаторах с расщеплённой обмоткой

Токоограничивающим реактором (ТР) называют электрический аппарат (катушку), предназначенный для ограничения ударного тока короткого замыкания (КЗ) посредством последовательного включения в цепь и работающий как дополнительное индуктивное сопротивление [9].

Разновидностью ТР являются сдвоенные токоограничивающие реакторы. Они имеют в средней точке вывод, от которого отходят две индуктивности (одна фаза), встречно сходящиеся в выводе (рисунок 4).

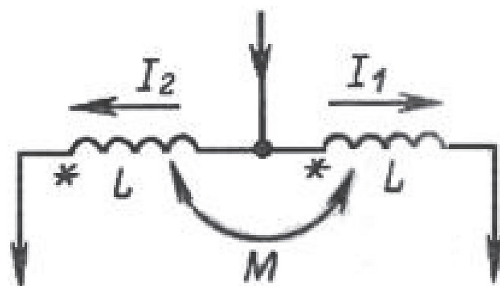


Рисунок 4. Электрическая схема сдвоенного ТР

Явление взаимоиנדукции в сдвоенных реакторах с пользой используется в разных режимах. Поскольку катушки включены встречно, то результирующее индуктивное сопротивление каждой ветви падает, что приводит к снижению потери напряжения в номинальном режиме.

При КЗ на одной из ветвей ток КЗ значительно больше тока в неповрежденной ветви, и, следовательно, влиянием взаимоиנדукции, уменьшающим индуктивное сопротивление ветви, можно пренебречь.

Если же на концах ветвей расположены генераторы, и произошло КЗ на одной из ветвей, то токи в двух остальных ветвях протекают в одном направлении к точке КЗ. Поскольку в этом случае катушки включены согласно, индуктивное сопротивление катушки ветви с КЗ повышается, что приводит к значительному токоограничивающему эффекту.

Обойтись без токоограничивающих реакторов позволяет эксплуатация трансформаторов с расщеплённой обмоткой, например ТРДН. Благодаря определённому включению двух обмоток со стороны низкого напряжения явление взаимоиנדукции позволяет уменьшить ток КЗ в 1,5–2 раза по сравнению с трансформатором без расщеплённой обмотки.

Принцип действия обычного ТР основан на явлении самоиндукции. Обмотки соседних фаз ТР включают встречно, чтобы ограничить действие электродинамических усилий в момент КЗ. Однако нам представляется возможным конструктивное выполнение одной фазы ТР так, чтобы она была представлена согласным включением двух магнитно-связанных катушек, что повысит индуктивность и токоограничивающие свойства реактора.

Выводы

Явление взаимоиנדукции играет важную роль в электроэнергетических вопросах и даёт разный эффект в тех или иных случаях. В некоторых случаях представляется возможным эффективно нивелировать негативное влияние взаимоиנדукции или разработать конструктивное решение, уменьшающее его, а иногда извлечь из него пользу. Например, из-за многожильности проводов линий электропередачи имеет место негативное влияние взаимоиנדукции, которое повышает индуктивное сопротивление провода, что ведёт к дополнительным потерям электрической энергии при её передаче. В совокупности с другими факторами имеет смысл рассмотреть возможные варианты эксплуата-

ции цельных полых проводов, в которых явление взаимной индукции не наблюдается. Было установлено, что если уменьшить диаметр заземлителей в заземляющем устройстве подстанции и сократить влияние взаимной индукции путём отдаления их друг от друга, можно добиться экономии стали на

производство заземлителей. В токоограничивающих реакторах можно рассмотреть вопрос о согласном включении частей обмотки фазы реактора для того, чтобы они взаимно увеличивали своё индуктивное сопротивление и улучшали токоограничивающий эффект.

Список литературы

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. Т. 1. 463 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
3. Попов В.С., Николаев С.А. Общая электротехника с основами электроники. М.: Энергия, 1972. 504 с.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей: справочная книга. Ленинград: Энергия, 1986. 488 с.
5. Лопарев В.В., Образцов Ю.В. Об особенностях современных неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи // Кабели и провода. 2014. № 6. С. 9–15.
6. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. Т. 3. 377 с.
7. Ершевич В.В., Зейлингер А.Н., Илларионов Г.А. и др. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
8. Найфельд М.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности. М.: Энергия, 1971. 312 с.
9. Токоограничивающий реактор. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Токоограничивающий_реактор (дата обращения: 03.08.2019).

References

1. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov: v 3 t.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for High Schools: in 3 Vol.]. 4 ed. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003. Vol. 1. 463 p. [in Russian].

2. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electric Circuits]. 9 ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p. [in Russian].

3. Popov V.S., Nikolaev S.A. *Obshchaya elektrotekhnika s osnovami elektroniki* [General Electrical Engineering with the Basics of Electronics]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 504 p. [in Russian].

4. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Raschet induktivnostei: spravochnaya kniga* [Inductance Calculation: A Reference Book]. Leningrad, Energiya Pobl., 1986. 488 p. [in Russian].

5. Loparev V.V., Obratsov Yu.V. Ob osobennostyakh sovremennykh neizolirovannykh provodov dlya vozdushnykh linii elektroperedachi [On the Features of Modern Non-Insulated Wires for Overhead Power Lines]. *Kabeli i provoda — Cables and Wires*. 2014, No. 6, pp. 9–15. [in Russian].

6. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov: v 3 t.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for High Schools: in 3 Vol.]. 4 ed. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003. Vol. 3. 377 p. [in Russian].

7. Ershevich V.V., Zeilinger A.N., Illarionov G.A. e.a. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem* [Handbook for the Design of Electric Power Systems]. 3d ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 352 p. [in Russian].

8. Naifel'd M.R. *Zazemlenie, zashchitnyye меры elektrobezopasnosti* [Grounding, Protective Electrical Safety Measures]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 312 p. [in Russian].

9. *Tokoogranichivayushchii reaktor* [Current Limiting Reactor]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Токоограничивающий_реактор (assessed 03.08.2019). [in Russian].