

ЛИНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОВОДА ОДНОЙ ИЗ ФАЗ И В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТЫ ОТ ГРОЗОВЫХ УДАРОВ

В. К. Щербаков.

I.

Ежегодные капиталовложения на строительство высоковольтных линий электропередачи составляют в нашей стране десятки и даже сотни миллионов рублей. Строительство этих линий связано к тому же с затратой тысяч тонн остро дефицитных цветных металлов и качественной стали. Необходимость защищать высоковольтные линии электропередачи от грозовых ударов еще более увеличивает и эти капиталовложения и расход дефицитных металлов. Так, оборудование 110 кв. линий, сооруженных на деревянных опорах, защитными стальными тросами повышает стоимость линий в полтора—два раза ¹⁾ и требует дополнительно на каждую сотню километров двухцепной линии высококачественного стального троса 150—200 тонн.

Защита линий может осуществляться и другими, помимо подвески защитного троса, средствами, например, установкой вдоль линии большого числа специальных громоотводов (диверторов) или установкой на опорах линии разрядников. Однако и эти средства защиты обычно стоят не дешевле, чем защита тросом, которая в ряду других видов защиты является наиболее простой и надежной.

Далеко не все высоковольтные линии электропередачи, находящиеся в эксплуатации в настоящее время в СССР, снабжены необходимыми средствами защиты от грозовых ударов; отсутствие защитных приспособлений, как правило, объясняется дороговизной этих приспособлений и еще в большей степени дефицитностью материалов, требующихся при сооружении защиты, в частности и в первую очередь—стального троса. Вместе с тем трудно найти район в Союзе, который был бы совершенно благополучным в отношении грозовых ударов. Нет нужды подробно доказывать какой, часто огромный, материальный ущерб приносят народному хозяйству СССР перерывы в подаче электроэнергии по причине грозовых ударов в линии электропередачи, лишенные необходимого оборудования защиты.

В настоящей работе предлагаются пути сооружения грозоупорных высоковольтных линий электропередачи без привлечения специальных средств защиты в виде тросов, диверторов, разрядников и т. д. Предлагается в качестве защиты от грозовых ударов использовать рабочие провода самой же линии. Один из трех проводов, в случае одноцепной 3-х фазной линии, или два из шести, в случае двухцепной линии, можно всегда расположить на опоре так, чтобы этот провод или эти провода выполнили бы роль громоотводов, т. е. заменили бы обычно специально подвешиваемые для этой цели защитные тросы. Вся трудность,

¹⁾ Проф. А. А. Глазун, Электрические сети и системы, часть I, приложение XVIII, 1939 г.

далее, заключается лишь в том, чтобы обеспечить во-время и быстро сток в землю энергии грозового удара без нарушения изоляции линии.

Наиболее просто эта задача решается путем постоянного заземления провода одной из фаз, провода, который при соответствующем расположении на опоре обеспечит защиту линии. Потенциал относительно земли этого провода, таким образом, практически будет равен нулю, зато потенциалы проводов двух других фаз достигнут значения $\sqrt{3} \cdot U_{\phi}$; работа линии будет связана с протеканием тока в земле, иногда значительной величины. Изоляция электропередачи ставится в новые условия работы; ток в земле и асимметрия потенциалов проводов линии значительно повышают вредное влияние на провода связи; появляется асимметрия напряжений и токов в электропередаче.

В последующем будет выяснена (сколь возможно) допустимость отмеченных выше особенностей электропередачи с заземленной фазой с точки зрения нормальной эксплуатации такой передачи, но уже предварительно можно отметить, что развитие теоретической и практической электротехники в последние годы позволяет сейчас многие явления, сопровождающие работу несимметричной линии передачи, принять как вполне допустимые, хотя еще не так давно эти явления казались недопустимыми. Так, доц. М. И. Михайлов и проф. П. А. Азбукин в книге, вышедшей из печати в конце 1940 г.²⁾, указывают сравнительно простые средства защиты линии связи от вредного мешающего влияния линий высокого напряжения, разработанные в последнее время и опробованные в лабораториях и в практике эксплуатации линий связи. Эти средства защиты обеспечивают возможность параллельного следования линий связи и несимметричных линий высокого напряжения почти при любом расстоянии между ними. Особо важными нужно считать достижения в вопросе защиты от мешающих влияний на однопроводные линии связи, которые до последнего времени считались беззащитными в этом отношении.

Многое должно быть учтено в опыте эксплуатации линий, работающих по системе „два провода—земля“, где условия работы электропередачи во многих отношениях являются аналогичными условиям работы линий с заземленной фазой. Система ДПЗ в последние годы подробно изучалась многими организациями СССР и отдельными лицами и вместе с тем сравнительно быстро внедрялась в практику строительства и эксплуатации электропередач. Так, за последнее десятилетие построено и введено в эксплуатацию свыше тысячи километров линий по системе ДПЗ, из них:³⁾ 35 кВ—61 км, 22 кВ—220 км; почти три четверти этих линий построено в сельскохозяйственных районах.

Особенно широко было поставлено изучение вопросов, связанных с эксплуатацией и проектированием системы ДПЗ в электросети Ленэнерго, где для целей экспериментального изучения вопроса были выделены опытные участки линий электропередачи. Результаты этих экспериментальных исследований и теоретических выкладок были опубликованы в 1935 г. в книге инж. П. С. Орешкинского.⁴⁾

Подробные исследования проводились также в системе Мосэнерго на опытной 35 кВ линии, где обстоятельно обследовался вопрос о влиянии электропередачи, работающей по системе ДПЗ, на провода связи, а также и другие вопросы.⁵⁾

²⁾ М. И. Михайлов и П. А. Азбукин, Воздушные и кабельные линии связи и их защита, Связьиздат, 1940 г.

³⁾ Л. Э. Эбин, Сети с использованием земли в качестве одного из проводов, Ж. Эл. станции, № 8, 1939 г.

⁴⁾ П. С. Орешкинский, Передача энергии трехфазным током по системе „два провода—земля“, изд. Академии Наук, 1935 г.

⁵⁾ Инж. А. М. Гольдберг, Использование земли в качестве третьего провода в системе Мосэнерго. Ж. Эл. Станции, № 10, 1935 г.

Основными затруднениями, которые предстояло преодолеть на пути внедрения в жизнь системы ДПЗ, являлись следующие моменты:

- 1) неисследованное поведение заземлителей при длительном прохождении больших токов через них;
- 2) наличие асимметрии токов и напряжений за счет асимметрии сопротивлений и емкостных токов фаз линии системы ДПЗ;
- 3) неясность с возможностью использования уже разработанных и опробованных систем защиты от токов к. з.;
- 4) повышенные требования к изоляции линий и п/станций, в частности— к изоляции трансформаторов, при нормальном режиме и перенапряжениях;
- 5) значительное индуктивное влияние на провода связи, обусловленное асимметрией потенциалов проводов и расположения фазных токов линий системы ДПЗ относительно линий связи (ток одной фазы проходит в земле на большой глубине).

В настоящий момент, на основании упомянутых выше экспериментальных и теоретических исследований в системах Ленэнерго и Мосэнерго, а также учитывая опыт работы сетей ДПЗ в сельскохозяйственных районах, сделаны следующие выводы о работе линий по системе ДПЗ:

- 1) осуществление рабочих заземлений в системе ДПЗ существенных затруднений не встречает; в качестве рабочего заземления обычно может быть использовано защитное заземление п/станций;
- 2) серьезных затруднений к применению существующих видов защиты от токов к. з. в системе ДПЗ не встречается;
- 3) асимметрия токов и напряжений в допустимых размерах может быть обеспечена без особых затруднений⁶⁾;
- 4) в установках с номинальным напряжением до 35 кВ переход на систему электропередачи ДПЗ не вызывает необходимости в усилении изоляции линии и трансформаторов;
- 5) влияние на провода связи и особенно однопроводные—значительно; главную часть этого влияния составляет электромагнитное влияние; специальные исследования ВЭИ показали, что и на расстояниях свыше 10 км влияние на однопроводные линии связи имеется.

Таким образом, учитывая опыт эксплуатации линий ДПЗ и достижения в области защиты линий слабого тока от мешающих влияний,—следует в дальнейшем особо внимательно остановиться на выяснении, главным образом, следующих двух вопросов:

- 1) в допустимых ли пределах будет лежать величина неизбежной асимметрии напряжений и токов в электропередачах с заземленной фазой за счет асимметрии емкостных токов линии и ответвления части тока линии в землю;
- 2) в связи с возрастанием величины потенциалов проводов двух фаз относительно земли в $\sqrt{3}$ раза при постоянном заземлении провода третьей фазы, возможно ли сохранить существующий уровень изоляции симметричных трехфазных электропередач при переходе к электропередаче с постоянно заземленной одной фазой того же номинального напряжения; если нет, то сколь сильно должен возрасти этот уровень изоляции; при разрешении вопроса с уровнем изоляции необходимо будет учесть возможность новых требований к изоляции со стороны перенапряжений и особенно коммутационных.

Нужно заметить, что система ДПЗ при номинальном напряжении 110 кВ и выше не применялась и не изучалась, поэтому, надо полагать, вопрос о защите линий ДПЗ от грозových перенапряжений специально не ставился.

⁶⁾ Емкостные токи в исследованиях специально не учитывались; система ДПЗ мыслилась (может быть на первых порах) при номинальных напряжениях до 35 кВ; не учитывались возможные большие емкостные токи в кабельных сетях.

Это важно заметить потому, что обеспечивая надежную и, пожалуй, наиболее дешевую защиту линии ДПЗ подвеской специального троса, мы возвращаемся к трехпроводной линии, тем более, что предел допустимой асимметрии токов в электропередаче требует, как это показывают подсчеты, подвески в качестве третьего провода не стального троса, а провода из цветного металла с достаточной проводимостью; правда, этот провод может быть взят меньшего сечения, чем сечения проводов двух других фаз, но тогда, между прочим, его стоимость получается не выше стоимости стального троса.

Постоянное и жесткое заземление одной фазы не единственный способ использования провода одной из фаз и в качестве защиты и обеспечивающий сток энергии прямого удара в землю. Этот сток можно обеспечить, сохраняя изоляцию электропередачи в том виде, или почти в том виде, как это имеет место обычно в симметричных электропередачах, с тем лишь различием, что гирлянды провода, осуществляющего защиту линии, снабжаются дугоотводящими кольцами или рогами; гашение дуги, после того как энергия удара будет отведена в землю, обеспечивается наличием на подстанциях дугогасящих аппаратов. Наконец, может оказаться в некоторых случаях целесообразным сток энергии грозового удара в землю осуществить через разрядники, установленные на одной фазе на опорах линии.

II

Схема электропередачи с использованием провода одной из фаз и в качестве защиты, когда этот провод постоянно и жестко заземляется на каждой опоре, представлена на рис. 1. Требования к переходным сопротивлениям заземления опор здесь те же, что и в случае подвески специальных тросов на опорах. На подстанциях по концам линии заземленный провод подключается к защитным заземлениям подстанций и используется

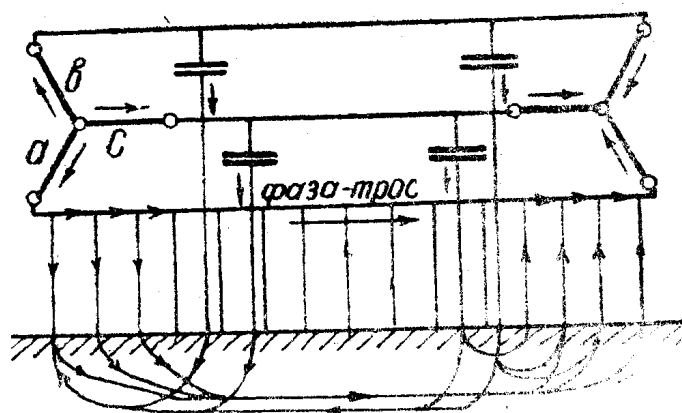


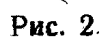
Рис. 1.

на подстанциях также для двух целей: и как провод и шина одной из фаз, и как защита подстанции от грозовых ударов. Есть все основания полагать, что во время коммутационных операций на подстанциях заземленную фазу можно не выключать, т. е. можно ограничиться постановкой выключателей и разъединителей лишь на двух незаземленных фазах.

Расположение проводов на опорах может быть принято обычное, если иметь ввиду железные опоры двухцепных линий с тросами; места тросов на опоре займут провода заземленной фазы, а нижняя траверса опоры окажется ненужной, соответственно высота и вес опоры за счет этого снизятся.

Емкостные токи линии, обусловленные несимметричностью потенциалов проводов (рис. 2), дадут также несимметричную 3-х фазную систему. Используя уравнения Максвелла, в соответствии с обозначениями рис. 3, найдем заряды проводов:

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_1 &= C_{11} \cdot \bar{U}_{10} + C_{12} \cdot (\bar{U}_{10} - \bar{U}_{20}) + C_{13} \cdot (\bar{U}_{10} - \bar{U}_{30}) \\ \bar{q}_2 &= C_{12} \cdot (\bar{U}_{20} - \bar{U}_{10}) + C_{22} \cdot \bar{U}_{20} + C_{23} (\bar{U}_{20} - \bar{U}_{30}) \\ \bar{q}_3 &= C_{13} (\bar{U}_{30} - \bar{U}_{10}) + C_{23} \cdot (\bar{U}_{30} - \bar{U}_{20}) + C_{33} \cdot \bar{U}_{30} \end{aligned} \right\}$$



Соответственно фазовые емкостные токи получаются, как

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_{c1} &= j3\omega \cdot U_1 C_{12} \\ \bar{I}_{c2} &= \sqrt{3} \cdot \omega \cdot U_1 C_{23} + j\omega \sqrt{3} U_1 (C_{22} + C_{12}) \angle -150^\circ \\ \bar{I}_{c3} &= -\sqrt{3} \cdot \omega \cdot U_1 C_{23} + j\omega \sqrt{3} U_1 (C_{22} + C_{12}) \angle 150^\circ \end{aligned} \right\}$$

Подсчитанный таким образом емкостный ток первой (заземленной) фазы будет представлять лишь заряд, связанный с заземленным проводом. Этот ток будет перекрываться суммой обратных токов двух других незаземленных фаз, равной

$$\begin{aligned} \bar{I}_{c2} + \bar{I}_{c3} &= [\sqrt{3} \cdot \omega \cdot U_1 C_{23} + j\omega \sqrt{3} U_1 (C_{22} + C_{12}) \angle -150^\circ] + \\ &+ [-\sqrt{3} \cdot \omega \cdot U_1 C_{23} + j\omega \sqrt{3} U_1 (C_{22} + C_{12}) \angle 150^\circ] = \\ &= j\omega 3 \cdot U_1 (C_{22} + C_{12}). \end{aligned}$$

Векторные диаграммы фазовых напряжений, потенциалов и емкостных токов представлены на рис. 4 и 5.

Как ток, отдаваемый в конце линии передачи, так и емкостный ток будут протекать по проводу заземленной фазы лишь частично. Часть тока

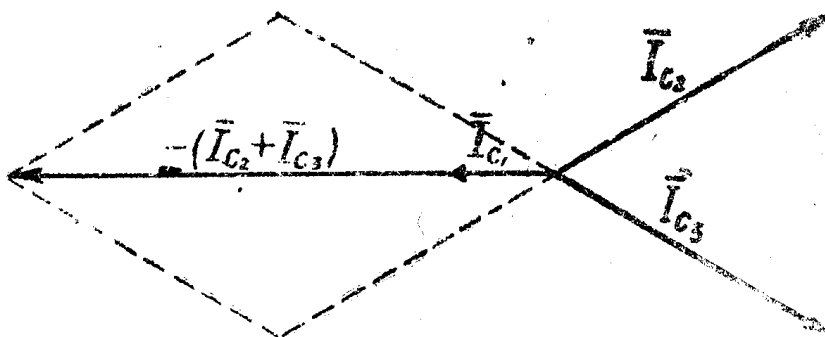


Рис. 5.

заземленной фазы ответится в землю. Это обстоятельство, помимо несимметрии емкостных токов, само по себе, приведет к несимметрии фазовых токов линии. Конечным результатом протекания по проводам линии системы несимметричных токов будет появление во всей электропередаче и в генераторах станции тока обратной последовательности. Размер допустимой величины тока обратной последовательности в генераторах регламентируется „Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей“⁷⁾, согласно которым допускается работа генераторов при неравенстве токов в фазах в 10%, что эквивалентно наличию составляющей обратной последовательности в размере немного более 5%.

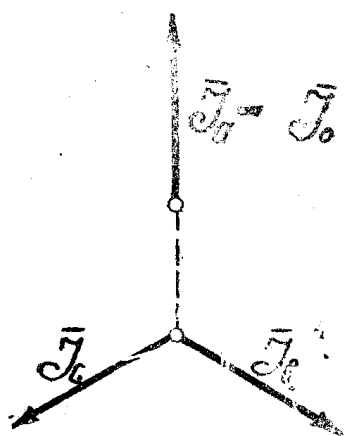


Рис. 6.

Для подсчета составляющей обратной последовательности тока в генераторах, нужно знать напряжения обратной последовательности всех элементов электропередачи и, в первую очередь, линии. В свою очередь симметричные составляющие фазовых напряжений линии определяются прежде всего симметричными составляющими фазовых токов, а эти послед-

ние можно легко определить, если знать токи в проводах всех трех фаз линии. Можно вполне допустить, что в конце линии отбирается симметричная трехфазная система токов, если считать, что общая асимметрия токов и

⁷⁾ „Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей“, Госэнергоиздат, 1940 г.

напряжений электропередачи не превосходит допустимых пределов. Такое допущение не скажется заметно на конечных результатах расчета. Таким образом, токи проводов незаземленных фаз сразу же определяются как токи, соответствующие мощности отбираемой в конце линии. Что же касается тока в проводе заземленной фазы, то таковой получится в виде суммы двух токов:

1) части тока заземленной фазы, отбираемого в конце линии (рабочий ток);

2) части емкостного тока заземленной фазы, как суммы токов двух других фаз.

Примечание: Токи активной проводимости здесь не принимаются во внимание, как обычно выпадающие из практических расчетов по причине их незначительности; если же эти токи почему либо нужно было учесть, это можно было бы сделать точно так же, как указывается в отношении учета емкостных токов.

При разделении токов заземленной фазы на две части—в проводе и в земле—к сожалению, нельзя воспользоваться простым соотношением между сопротивлениями провода заземленной фазы и земли, так как если подсчет сопротивления петли провод—земля не представляет никаких затруднений, то выделить из общего сопротивления этой петли часть, относящуюся к земле,—представляется затруднительным. Поэтому приходится прибегнуть к рассмотрению тока заземленной фазы, как тока нулевой последовательности двухфазной системы токов, протекающих в двух незаземленных фазах линии.

Так, первая система токов линии, за счет нагрузки, представлена на рис. 6. Ее симметричные составляющие будут:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{2} (\bar{I}_b - \bar{I}_c),$$

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{2} (\bar{I}_b + \bar{I}_c) = \frac{1}{2} (-\bar{I}_a),$$

т. е. ток заземленной фазы (фаза *a*)

$$\bar{I}_a = -2 \bar{I}_0 = -(\bar{I}_{bo} + \bar{I}_{co}).$$

Пути следования токов нулевой последовательности, согласно проведенному разложению, представлены на рис. 7-а и 7-б.

Для отдельно взятой фазы *b*, применительно к рис. 7-а, можно написать равенство

$$j \bar{I}_{bo} \cdot \omega \cdot L_{nn} + j \bar{I}_{bo}'' \cdot \omega \cdot M + \bar{I}_{bo} \cdot R_n + (\bar{I}_{bo} + \bar{I}_{bo}'') \cdot R_n = \\ = j \bar{I}_{bo}'' \cdot \omega \cdot L_{nз} + j \bar{I}_{bo}'' \cdot \omega \cdot M + \bar{I}_{bo} \cdot R_з + (\bar{I}_{bo} + \bar{I}_{bo}'') \cdot R_n;$$

где $\bar{I}_{bo}$ и $\bar{I}_{bo}''$ —части тока нулевой последовательности в проводе и земле;
 L_{nn} —коэффициент самсиндукции петли—провод *b*—провод *a*;
 $L_{nз}$ —коэффициент самоиндукции петли—провод *b*—земля;

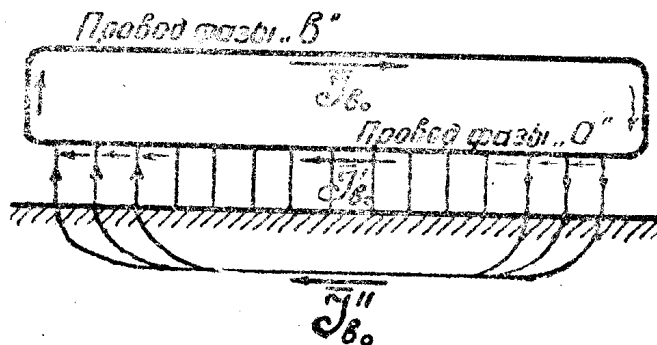


Рис. 7-а.

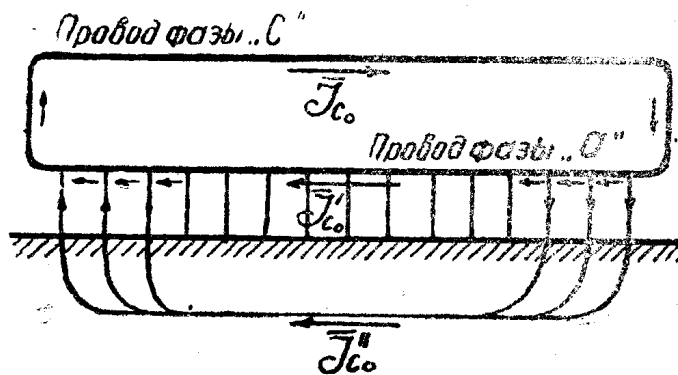


Рис. 7-б.

M — коэффициент взаимной индукции петли провод—провод и петли провод—земля;
 R_n и R_s — соответственно активное сопротивление одного провода петли и активное сопротивление земли.

Последнее равенство позволяет найти отношение

$$\frac{\bar{I}_{bo}}{\bar{I}''_{bo}} = \frac{R_s + j(\omega L_{ns} - \omega M)}{R_n + j(\omega L_{nn} - \omega M)}.$$

Полученное отношение не будет отвечать действительности потому, что в последних рассуждениях не была учтена взаимная индукция цепей

с токами фазы c и, кроме того, сопротивление провода заземленной фазы (фазы a) нужно удвоить, так как этот провод дважды участвует в рассуждениях: и применительно к фазе b , и применительно к фазе c . С учетом взаимной индукции всех цепей и удвоения активного сопротивления провода фазы a получается отношение токов $\bar{I}_{bo}$ и $\bar{I}''_{bo}$ несколько сложнее, но порядок рассуждения и характер конечного результата получается тот же самый ⁸⁾.

Применительно к 110 кВ линии электропередачи с расположением проводов на опоре (рис. 8) и с проводами АС—185 и при удельном сопротивлении земли $\rho = 100 \text{ } \Omega/\text{м}^3$, отношение

$$\frac{\bar{I}_{bo}}{\bar{I}''_{bo}} = \frac{\bar{I}_{\text{провода}}}{\bar{I}_{\text{земли}}} = \frac{0,197 + j1,20}{0,330 + j0,845} = 1,34 \angle 12^\circ,$$

т. е.

$$\bar{I}_{np} = 0,573 \bar{I}_a \angle 2^\circ 30',$$

$$\bar{I}_s = 0,432 \bar{I}_a \angle -9^\circ 30'.$$

Если провод заземленной фазы выполнить меньшего сечения чем провода двух других фаз, например, взять провод АС—95, то тогда отношение

$$\frac{\bar{I}_{bo}}{\bar{I}''_{bo}} = \frac{\bar{I}_n}{\bar{I}_s} = 1,15 \angle 27^\circ,$$

т. е.

$$\bar{I}_{np} = 0,550 \bar{I}_a \angle 12^\circ 30',$$

$$\bar{I}_s = 0,477 \bar{I}_a \angle -14^\circ 30'.$$

Так как емкостный ток заземленной фазы представляет собою сумму емкостных токов двух других фаз, то 2-х фазная несимметричная система емкостных токов, представляемая фазами b и c при разложении на симметричные составляющие также дает

$$\bar{I}_{co} = \frac{1}{2}(\bar{I}_{bc} + \bar{I}_{cc}) = \frac{1}{2} \bar{I}_{ac},$$

⁸⁾ Подробнее см. В. К. Щербakov, Эл. расчет трехфазных линий электропередачи с постоянно заземленной фазой. Принято к печати в Известиях ТИИ.

следовательно, и емкостный ток фазы *a* можно рассматривать как сумму емкостных токов нулевой последовательности, указанной выше двухфазной несимметричной системы. Учитывая, что пути протекания емкостных токов и рабочих токов нулевой последовательности одни и те же, можно написать, что

$$\frac{\bar{I}_b}{\bar{I}_b''} = \frac{I'_{bc}}{I''_{bc}},$$

т. е. емкостный ток в фазе *a* делится на две части в том же отношении, как и ток линии, обусловленный нагрузкой конца линии.

Зная токи в проводах линии, а также в других частях электропередачи, уже нетрудно подсчитать напряжения и токи обратной последовательности в различных частях электропередачи и определить асимметрию токов в генераторе.

Например, в электропередаче—генератор—повысительный трансформатор—линия, при следующих данных:

а) генератор—58,9 мва, 10,5 кв, $X=14\%$, на шинах отбор 8 мвт. $\cos\varphi=0,8$;

б) трансформатор—60 мва, $X=11\%$, $R=0,5\%$;

в) линия—110 кв, двухцепная, $l=100$ км, АС-185, провод заземленной фазы АС-95, расположение проводов на опоре по рис. 8, $\rho_s=100 \Omega/\text{м}^2$; отбор мощности в конце линии—40 мвт, $\cos\varphi_n=0,85$;—получается в генераторе отношение

$$\frac{I^{(2)}}{I^1} 100 = 3,93\%.$$

Следовательно, на основании изложенного можно считать, что в отношении появления токов обратной последовательности недопустимой величины в генераторах станций, работающих в линии с заземленной фазой, электропередачи с заземленной фазой обычно будут вполне благополучны.

III.

В случае какой-либо необходимости ограничить ток в земле, появляющийся при заземлении одной из фаз, можно провод заземляемой фазы жестко связать с землею (вернее с заземляющим устройством) только в одной точке по длине линии, как это показано на схеме (рис. 9).

Однако, цель будет достигнута лишь в случае коротких линий, у которых емкостный ток мал: несмотря на то, что провод заземлен только в одной точке, емкостный ток, прежде чем попасть в провод заземленной фазы, протекает в земле. Возможность беспрепятственного отвода энергии прямого удара в землю обеспечивается наличием на каждой опоре искровых промежутков. Заземленный в одной точке постоянно, провод на всех других опорах должен иметь изоляцию, шунтируемую дугой в момент отвода энергии прямого удара. Уровень этой изоляции определяется требованием, чтобы при нормальном режиме электропередачи за счет падения напряжения в проводе искровые промежутки не пробивались. Следовательно, это должна быть изоляция порядка линейной на номинальное напряжение 6 киловольт.

Конструкция искровых промежутков должна быть максимально содействующей гашению вольтовых дуг. Есть основания полагать, что при обеспечении стабильности потенциала заземленного провода за счет жесткого подключения этого провода в одной точке (на рис. 9—в т. а) к „земле“, условия гашения дуг будут не хуже, чем при оборудовании систем гасительными аппаратами. Обердорфер⁹⁾ на основании опытов показывает,

⁹⁾ Г. Обердорфер, Замыкания на землю и борьба с ними. Энергониздат, 1932 г.

что дуги замыкания на землю с силой тока до 40 А в установках 35, 60 и 110 кВ самостоятельно гасли, если только дуга поддерживалась остаточным током недокомпенсации или перекомпенсации, т. е. надо полагать, когда катушка ограничивала колебание потенциалов проводов электропередачи, и, в первую очередь, провода с поврежденной изоляцией, и восстановление потенциала фазы было замедлено.

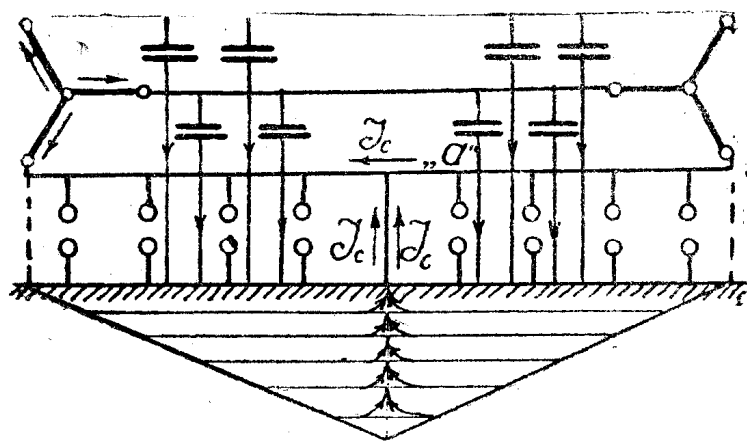


Рис. 9.

В рассматриваемом случае могут возникать дуги большей силы тока, так как пробой какого-либо искрового промежутка приведет к замыканию на землю провода еще в одной точке и тем самым обеспечит отведение части тока в землю, как это было выяснено выше. Здесь могут возникнуть

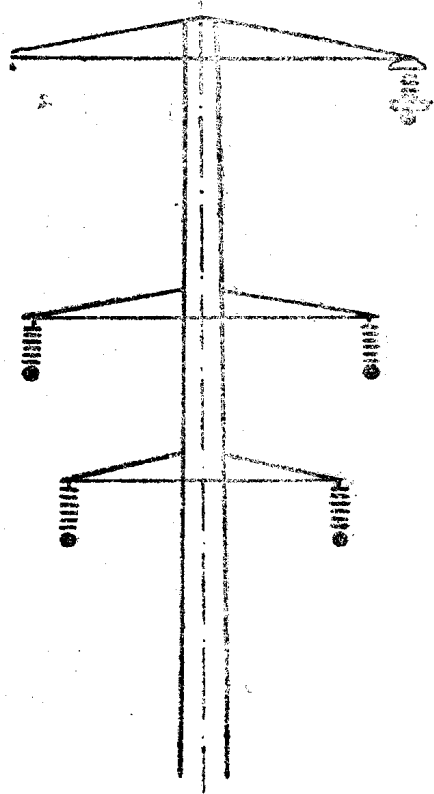


Рис. 10.

дуги с силой тока в 100 и более ампер, и гашение таких дуг, видимо, можно обеспечить лишь максимальным снижением разности потенциалов на электродах искровых промежутков и выбором такой конструкции электродов этих промежутков, при которой был бы ускорен разрыв дуги за счет ее выдувания. Разность потенциалов на искровых промежутках определяется падением напряжения в заземленном проводе и, следовательно, лишь в коротких линиях, длиной в несколько десятков километров, могут быть получены необходимые условия гашения дуг искровых промежутков.

Как уже было указано, использование провода одной из фаз и в качестве защиты от грозных ударов можно осуществить, не нарушая обычной симметрии изоляции фаз электропередачи, следующим образом.

Провод одной фазы трехфазной линии, соответственно расположенный на опоре (рис. 10), снабжается на каждой опоре искровым промежутком, гарантирующим разряд через промежуток, а не по гирлянде изоляторов, при любых ненормальных повышениях потенциала провода. Если данная элек-

тропередача имеет изолированную нейтраль трансформаторов и снабжена приборами для гашения вольтовых дуг замыкания на землю—катушкой Петерсена, трансформатором Бауха, гасителем Рейтгоффера и др.,—то при соответствующей конструкции искрового промежутка отвод в землю

энергии грозового удара будет надежно обеспечен без перерыва в работе электропередачи. Опыт сооружения и эксплуатации искровых промежутков на гирляндах имеется большой, промежутки с различной формой электродов (кольца, полукольца, двух- и односторонние рога и т. д.) успешно справляются с задачей отведения дуги от гирлянды. В нашем случае требуется, чтобы конструкция промежутка гарантировала невозможность надувания дуги на гирлянду при каком-либо неблагоприятном направлении ветра и обеспечивала бы горение дуги на расстоянии, безопасном для гирлянды в термическом отношении.

Искровой промежуток фазы—троса в огромном большинстве случаев будет нагружаться дугами за счет некомпенсированного или перекомпенсированного тока величиною максимум 30—40 ампер. Поэтому нет особых причин опасаться этих кратковременных дуг и можно величину искровых промежутков снизить до уровня, который бы обеспечил не особенно частые его перекрытия по причине коммутационных перенапряжений. Это необходимо сделать и для того, чтобы быть уверенным, что при возникновении высокого потенциала на опоре ни в коем случае не перекроет гирлянды двух других фаз.

Заземление каждой опоры, само собою разумеется, должно быть вполне удовлетворяющим всем требованиям, предъявляемым обычно к заземлениям защитных тросов¹⁰⁾.

Расстояние провода фазы-троса до проводов двух других фаз придется увеличить до значений, указанных в нижеследующей таблице:

Напряжение в киловольтах	Пролет в метрах	Расстояние в метрах
35	150÷200	3,5÷4,5
110	150÷250	4,5÷5,5
220	200÷300	5,5÷7,5

Это расстояние немногим больше обычно принятых расстояний между проводами линии, и поэтому асимметрия сопротивлений проводов, нужно ожидать, не будет значительной.

От транспозиции придется отказаться, по крайней мере, всех трех проводов; два нижних провода можно транспонировать, если от этого будет какая-либо польза. Отсутствие транспозиции скажется на увеличении степени влияния на провода связи.

Использование провода одной фазы в качестве защиты обеспечивает, видимо, надежную защиту от грозовых ударов линии электропередачи, но не подстанции. Подходы к подстанциям и сами подстанции должны защищаться специальными тросами или диверторами.

Настоящий вариант использования провода одной фазы и в качестве защиты предусматривает обязательное оборудование электрической системы гасительными аппаратами и, всего вероятнее,—катушкой Петерсена. В связи с этим небезинтересно отметить отношение к гасительным аппаратам и, в частности, к катушке Петерсена американской практики.

Электропередачи с номинальным напряжением 110 кВ и выше до сего времени в СССР и США выполнялись почти исключительно с наглухо заземленной нейтралью, в большинстве же стран Зап. Европы, наоборот,—с изолированной нейтралью или с заземлением через индуктивные катушки. Однако в последние годы, как еще в свое время заметил проф. Л. И. Сиротинский¹¹⁾, по причине все более возрастающего электромагнитного

¹⁰⁾ И. С. Стекольников и В. В. Яворский, Основы проектирования грозоупорных систем, часть 1, ОНТИ, 1935 г.

¹¹⁾ Проф. Л. И. Сиротинский, Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках. ОНТИ, 1937 г.

влияния на провода связи за счет огромных токов замыкания на землю, желания сократить до минимума причины, приводящие к расстройству параллельной работы электрических систем,—в Америке начинают отступать от глухих заземлений. Больше того, американские системы начинают остро интересоваться катушкой Петерсена, что нашло свое отражение в периодической американской литературе, заполненной в последнее время статьями и дискуссиями по вопросу о достоинствах и недостатках катушки Петерсена, ее настройке, анализа работы систем, снабженных катушками Петерсена¹²⁾. В Америке, в Колорадо в работе имеется 220 кВ электропередача, снабженная катушкой Петерсена в 1938 г.¹³⁾, причем заметим, что эта же электропередача имеет на всем протяжении два защитных троса.

При рассмотрении поставленного вопроса неважно, является ли катушка Петерсена тем именно аппаратом, который необходим для работы электрической системы с изолированной нейтралью, или для гашения перемежающихся дуг необходимо искать другие способы,—важно то, что практика заставляет отказываться от глухого заземления, важно сделать вывод, что системы с изолированной нейтралью или, что то же самое, с занулением через индуктивные катушки с большими сопротивлениями, экономически являются целесообразными, если иметь в виду практику Зап. Европы и тенденции Америки в этом отношении.

Нужно, наконец, указать, что вместо дугогасящих аппаратов и дугогасящих колец, можно снабдить фазу, выполняющую роль защиты, разрядниками на опорах линии.

Варианты использования провода одной из фаз и в качестве защиты, не нарушая обычной симметричной изоляции фаз линии, исключают возможность транспозиции всех трех проводов линии, если не идти на неизбежное удорожание линии. Можно транспонировать два нижних провода, что, как показывает исследование этого вопроса, дает также благоприятный эффект. Так, например, применительно к линии передачи с расположением проводов АС-185 по рис. 8 в случае отсутствия транспозиции появляется ток в земле в размере $1,2 \cdot 10^{-2}$ А/км, транспозиция двух нижних проводов снижает этот ток до $0,74 \cdot 10^{-2}$ А/км. Некоторое выравнивание индуктивных сопротивлений фаз линии за счет транспонирования нижних проводов также достигается. Так, в том же примере линии значение коэффициента самоиндукции получается:

а) без транспозиции

$$\begin{aligned} L_a &= 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}, \\ L_b &= 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}, \\ L_c &= 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}, \\ L_{cp} &= 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}; \end{aligned}$$

б) с транспозицией нижних проводов

$$\begin{aligned} L_a &= 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}, \\ L_b &= 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}, \\ L_c &= 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}, \\ L_{cp} &= 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н/км}. \end{aligned}$$

IV.

Изоляция электропередач с заземленной фазой работает в новых условиях в сравнении с условиями работы в симметричных электропередачах: рабочий потенциал незаземленных фаз равен разности фазовых

¹²⁾ См., напр мер, "Transactions of the American Institut of Electrical Engineers" за 1938 г.,

¹³⁾ "Some Engineering Features of Petersen Coils and their Aplication by E. M. Hunter" Transactions of AIEE, 1938, vol. 57. P. 11—13.

напряжений, т. е. в $\sqrt{3}$ раза больше, чем потенциал фаз симметричной электропередачи того же номинального напряжения. Опыт эксплуатации электропередач по системе ДПЗ показал, что в трехфазных электропередачах с номинальным напряжением до 35 кВ включительно переход на режим работы с постоянным заземлением одной из фаз не требует усиления изоляции как линейной, так и на подстанциях. В отношении же электропередач с номинальным напряжением 110 кВ и выше опыта длительной эксплуатации электропередач с одной заземленной фазой не было. Правда, при конструировании и расчете изоляции на землю высоковольтных установок учитывается не только фазовое напряжение установок, но и линейное напряжение этих установок, но все же имеющаяся сейчас изоляция симметричных высоковольтных установок ориентирована на длительную эксплуатацию при потенциалах относительно земли, равных фазовому напряжению этих установок.

Чем определяется уровень изоляции высоковольтных систем, работающих с заземленной нейтралью?—Обычно кратностью имеющих место в установках „внутренних“ перенапряжений, и в первую очередь—коммутационных, по отношению к фазовому напряжению установок. Некоторые поправки вносит сюда расчет нужной грозоупорности этих установок. Анализ коммутационных перенапряжений в электропередачах с постоянной заземленной одной фазой показывает, что:

а) перенапряжения при отключении холостых линий дают амплитуду падающей волны на трансформатор не более $3 U_{\phi}$, т. е. в том же раз-
мере, как это имеет место в установках с заземленной нейтралью трансформаторов;

б) перенапряжения при выключении индуктивных нагрузок создают потенциал на обмотках отключаемого объекта относительно земли выше, чем в симметричных системах на величину, равную половине фазового напряжения.

Другие внутренние перенапряжения:

а) резонансные перенапряжения, в той их части, которая получается при резонансе на рабочую частоту и высшие гармонические составляющие, имеют условия для своего возникновения и развития в электропередачах с заземленной фазой те же, что и в симметричных системах; что же касается явления опрокидывания фазы, которое в симметричных установках при определенных условиях создает перенапряжения до $5 U_{\phi}$,—то это явление в установках с заземленной фазой, видимо, сохраняет тот же характер.

б) Дуговые перенапряжения—отсутствуют.

Таким образом только случай отключения индуктивной нагрузки дает повышение потенциала при перенапряжениях на половину фазового напряжения в нашем случае, но если учесть, что этот вид перенапряжений в симметричных установках не является самым опасным ($\sim 4,5 U_{\phi}$)¹⁴), нужно сделать вывод о пригодности изоляции симметричных установок, с точки зрения уровня изоляции, в условиях электропередач с заземленной фазой. Требования же к изоляции со стороны атмосферных перенапряжений в обоих случаях будут одинаковыми. Остается далее проверить как ведет себя изоляция под воздействием увеличенного рабочего потенциала.

Линейная изоляция. Неравномерное распределение падения напряжения вдоль гирлянды изоляторов приводит к перегрузке первых элементов (от провода) гирлянды при приложении к ней разности потенциалов в 110 кВ и выше. На первый элемент приходится около 20% всей разности потенциалов, приложенной к гирлянде¹⁵), причем эта доля

¹⁴) Л. И. Сиротинский, Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках, ОНТИ, 1937 г.

¹⁵) Л. И. Сиротинский, Техника высоких напряжений, часть II, ГОНТИ, 1939 г.

почти не изменяется с увеличением числа элементов в гирлянде. Если напряжение короны на элементе гирлянды оценивается в 15—20 кВ, то уже в 110 кВ электропередачах с заземленной фазой нужно ожидать появления короны на первом элементе гирлянды. Не совсем только ясно на основании имеющихся сведений в литературе, какова должна быть интенсивность короны, чтобы уже были основания опасаться постепенного разрушения облицовки фарфора. В 110 кВ электропередачах интенсивность короны будет настолько незначительна, что трудно ожидать заметного разрушения в течение срока службы изоляции. Опыты, проведенные в высоковольтной лаборатории Томского индустриального института, показали отсутствие видимой короны на 7-ми элементной гирлянде ($p=4,5$) в сухом и мокром состоянии под напряжением в 115 кВ относительно земли; точно также не обнаружено увеличения активной проводимости гирлянды в этих условиях.

Есть, однако, простое средство для выравнивания перепадов напряжения вдоль гирлянды: подвеска металлических колец по концам гирлянды снижает перепад напряжения на первом элементе, примерно, в два раза. Такие кольца будут совершенно обязательны для 220 кВ электропередач с заземленной фазой.

Изоляция трансформаторов для электропередач с заземленной фазой должна выполняться равнопрочной и между фазами и на землю; несколько ослабленной могла бы быть изоляция на землю одной из фаз. Нужно полагать, что 110 кВ трансформаторы, выполняемые в настоящее время для симметричных 3-х фазных систем, работающих с изолированной нейтралью, почти не потребуют переделок при переходе на режим с заземленной фазой. Трансформаторы, предназначенные для работы в системах с заземленной нейтралью, имеют, иногда, несколько ослабленную изоляцию на землю у нейтрали и потому прямо оказались бы не пригодными в электропередачах с заземленной фазой. Вопрос о конструкции трансформаторов, в смысле рационального размещения изоляции внутри трансформатора, требует соответствующей исследовательской работы специальных трансформаторных лабораторий в контакте с трансформаторными заводами.

V.

Влияние на провода связи высоковольтные линии передачи оказывают через:

- а) магнитное поле—электромагнитное влияние,
- б) электростатическое поле—электростатическое влияние.

В свою очередь оба вида влияния на провода связи подразделяются на опасные и мешающие. Опасные влияния определяются в первую очередь токами короткого замыкания и потому мало будут зависеть от системы электропередачи. Мешающие влияния наоборот определяются нормальным режимом электропередач и в очень большой степени от системы электропередачи.

Электростатическое мешающее влияние высоковольтной линии с заземленной фазой на однопроводную линию связи, согласно Электротехническим правилам и нормам ¹⁶⁾ подсчитывается по формуле:

$$U_0 = 300 \cdot E \cdot 10^{-3} \sum \frac{b \cdot c \cdot l_n \cdot p \cdot q}{(n+2)(a^2 + b^2 + c^2)};$$

¹⁶⁾ „Электротехнические правила и нормы“ часть 1, пятое издание, 1933. Новые „Нормы“ по расчету влияния на линии связи еще не опубликованы, хотя имеются сведения, что проект этих „Норм“ уже находится в печати.

электростатическое влияние на однопроводные линии связи в случае трехфазной симметричной (исправной) линии подсчитывается по формуле:

$$U_s = 0,25 \cdot E \cdot \sum \frac{c \cdot \delta \cdot l_n}{(n+2)(a^2 + b^2 + c^2)}$$

Сравнивая величины напряжений шумов в этих двух случаях, получаем увеличение напряжения шумов при заземлении одной из фаз в

$$\frac{300 \cdot 10^{-3} \cdot E \sum \frac{b \cdot c \cdot l_n \cdot p \cdot q}{(n+2)(a^2 + b^2 + c^2)}}{0,25 \cdot E \sum \frac{c \cdot \delta \cdot l_n}{(n+2)(a^2 + b^2 + c^2)}} = \frac{0,3 \cdot b \cdot l_n \cdot p \cdot q}{0,25 \cdot \delta \cdot l_n} \text{ раз;}$$

здесь b — высота подвески проводов линии сильного тока; в примерных подсчетах b будем принимать равным 12 м;

δ — расстояние между проводами линии электропередачи; в примерных подсчетах δ принято равным 4 м;

l_n — длина участка сближения в километрах; в примерных подсчетах применительно к симметричным (транспонированным) линиям можно принять $l_n = 10$ км, имея в виду, что длина шага транспозиции линий сильного тока, с расположением проводов не по углам треугольника, должна быть не более 12 км; применительно к линиям с заземленной фазой l_n равно всей длине участка сближения; если предположить, что 100 км—я линия электропередачи имеет на всем протяжении сближение с линией связи, то в этом случае $l_n = 100$ км;

p и q — коэффициенты, учитывающие снижение влияния за счет троп и соседнего леса; в примерных подсчетах будем принимать значение этих коэффициентов равным единице.

Таким образом, при 100 км—ом сближении напряжение шумов возрастает при заземлении одной из фаз линии в

$$\frac{0,30 \cdot 12 \cdot 100}{0,25 \cdot 4 \cdot 10} = 36 \text{ раз.}$$

Электромагнитное мешающее влияние определяется силой тока фаз линии электропередачи и не зависит от напряжения фаз и потенциалов проводов электропередачи; определяется системой трехфазного тока и суммарным действием всех трех фаз или еще вернее всех токов, сопровождающих работу электропередачи; определяется расположением фазовых токов электропередачи относительно проводов линий связи. Действующие сейчас высоковольтные трехфазные электропередачи являются практически симметричными, несущими симметричную трехфазную систему токов прямой последовательности (практически), сумма фазовых токов которой в любом сечении электропередачи равняется нулю. Транспозиция проводов уравнивает расстояния проводов фаз до линии связи. Поэтому при нормальном режиме здесь практически будет отсутствовать электромагнитное влияние.

Другая картина получается в случае электропередачи с заземленной фазой: в проводах несимметричная система токов, транспонируются только нижние провода, да и не имеет особого значения в этом случае транспозиция проводов. Напряжение шумов может быть весьма большим и влияние линий электропередачи на однопроводную линию связи может сказываться на расстоянии 10 км. Так, при токе в земле в 40 А и длине участка сближения в 150 км мешающее влияние сказывается на расстоянии 8 км.

Однако, как уже было указано выше, в настоящий момент имеется весьма эффективное средство защиты однопроводных линий связи от мешающих влияний. Используя американский опыт, научные сотрудники Института Электрификации сельского хозяйства т.т. Кюннер и Эбин провели практическое опробование эффективности применения трансформаторов с коэффициентом трансформации, равным единице, для борьбы с помехами в однопроводных линиях связи.¹⁷⁾ Этот способ дает возможность одинаково хорошо защитить линию связи как от электростатических, так и электромагнитных мешающих влияний. К тому же нужно добавить, что однопроводные линии телефонной связи в настоящее время не имеют широкого применения.

Двухпроводные линии связи в отношении электростатического мешающего влияния находятся в лучшем положении. Если взять отношение напряжений шумов в двух случаях: в случае влияния симметричной линии электропередачи и затем линии с заземленной фазой,—то это отношение будет равно

$$\frac{0,125 \cdot E \cdot \sum \frac{l_s \cdot b \cdot \delta}{a^2 + b^2 + c^2}}{0,07 E \cdot \sum \frac{l_s \cdot b \cdot \delta}{a^2 + b^2 + c_2}} = \frac{0,125}{0,70} \approx 1,8.$$

Мешающие электромагнитные влияния на двухпроводные линии связи также меньше, чем в случае однопроводных линий связи, но тем не менее при больших длинах участков сближения напряжение шумов может достигнуть значительных размеров. Двухпроводные линии связи страдают в этом отношении почти исключительно за счет асимметрии линии связи относительно земли. Это следует совершенно ясно из формулы для подсчета напряжения шумов от электромагнитного влияния, имеющей следующий вид, согласно „Временной инструкции по защите линий связи от влияния линий передачи трехфазного тока, в которых земля используется в качестве третьего провода“, изданной НКС по согласованию с Главэнерго в 1934 г.:

$$U_e = 100 \cdot l_s \cdot I_n \cdot M_2 + 0,5 \cdot l_n \cdot I_n \cdot M_1.$$

Первая часть этой формулы обусловлена неуравновешенностью линии связи по отношению к линии электропередачи, вторая же часть обусловлена асимметрией линии связи по отношению к земле. Отношение второй части к первой дает—

$$\frac{0,5 \cdot l_n \cdot I_n \cdot M_1}{100 \cdot l_s \cdot I_n \cdot M_2} = \frac{0,5 \cdot l_n \cdot M_1}{100 \cdot l_s \cdot M_2}.$$

Для сближения в 100 метров, при $l_n = 100$ км и $l_s = 1$ км, это отношение равно

$$\frac{0,5 \cdot 100 \cdot 180 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 1 \cdot 0,394 \cdot 10^{-3}} = 230;$$

значения M_1 и M_2 взяты из таблицы, упомянутой выше „Инструкции“.

Следовательно, защита двухпроводных линий связи в данном случае сводится к компенсации электрической асимметрии линии связи относительно земли. Соответствующие средства для этого имеются и представляется, что эта задача проще, чем защита однопроводных линий связи.

¹⁷⁾ М. И. Михайлов и П. А. Азбукин, Воздушные и кабельные линии связи и их защита. Связьиздат, 1940 г.

VI.

Заземление одной фазы электропередачи и повышение тем самым потенциала двух других фаз в $\sqrt{3}$ раза изменяет конфигурацию электрического поля проводов незаземленных фаз, что, в свою очередь, увеличивает напряженность электрического поля на поверхности этих проводов и понижает напряжение начала коронирования проводов, если это напряжение по прежнему измерять фазовым напряжением электропередачи.

По Пик у¹⁸⁾ следует, что напряженность электрического поля, при котором начинается ударная ионизация и в случае двух concentрических цилиндров и в случае двух параллельных цилиндров, примерно, одна и та же при прочих равных условиях; то же самое относится и к напряженности поля начала видимой короны, значение которой Пик дает:

а) для двух concentрических цилиндров

$$E'_k = 31,8 \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \text{ кВ/см},$$

б) для двух параллельных цилиндров

$$E''_b = 30,8 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \text{ кВ/см};$$

можно считать $E'_b = E''_b$.

И так как около поверхности внутреннего цилиндра двух concentрических цилиндров поле равномерное, можно сделать заключение, что около поверхностей параллельных цилиндров поле также одинаково по окружности цилиндров. К тому же выводу можно прийти, рассматривая выражение для максимального и минимального градиентов потенциала в зависимости от приложенного потенциала к комбинации из цилиндра и плоскости, параллельно расположенных:¹⁹⁾

$$E_{\max} = \frac{U}{a \sqrt{\frac{h-a}{h+a}} \cdot \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - a^2}}{a}},$$

$$E_{\min} = \frac{U}{a \sqrt{\frac{h+a}{h-a}} \cdot \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - a^2}}{a}},$$

эти оба выражения применительно к проводу над землею превращаются в простую зависимость:

$$E \approx \frac{U}{a \cdot \ln \frac{2h}{a}},$$

т. е. напряженность поля по окружности провода у поверхности его одинакова и, следовательно, напряженность поля на поверхности провода можно подсчитать как

$$E = \frac{q}{2\pi r \cdot 8,84 \cdot 10^{-9}} \text{ кВ/см}.$$

¹⁸⁾ Ф. В. Пик. Диэлектрические явления в технике высоких напряжений, перевод с английского под редакцией проф. Эпштейна, 1934 г.

¹⁹⁾ Проф. А. А. Смуров. Электротехника высокого напряжения и передача энергии, ГОНТИ, 1931 г.

Имея в виду прямую зависимость между критическим напряжением короны и критической напряженностью поля, нужно сделать вывод о наличии обратной пропорциональности между критическим напряжением короны и зарядом провода, если заряд провода почему либо увеличивается или уменьшается при неизменных расстояниях между проводами и неизменном напряжении линии электропередачи.

Заряды проводов линии в зависимости от потенциалов проводов, взаимного и по отношению к земле расположения проводов определяются с помощью известных максвелловских уравнений, уже однажды приводимых выше. Так, например, заряд второго провода симметричной трехфазной линии определится как

$$\begin{aligned} q'_2 &= C_{12}(\alpha U_a - U_a) + C'_{22} \cdot \alpha \cdot U_a + C'_{23}(\alpha \cdot U_a - \alpha^2 \cdot U_a) = \\ &= U_a [C'_{12}(\alpha - 1) + C'_{22} \cdot \alpha + C'_{23}(\alpha - \alpha^2)]; \end{aligned}$$

Заряд того же провода при заземлении фазы a (первый провод) определится как

$$\begin{aligned} q_2 &= C_{12} U_a(\alpha - 1) + C_{22} \cdot U_a(\alpha - 1) + C_{23} \cdot U_a(\alpha - \alpha^2) = \\ &= U_a [C_{12}(\alpha - 1) + C_{22}(\alpha - 1) + C_{23}(\alpha - \alpha^2)]. \end{aligned}$$

Сравнивая эти заряды, видим, что заряд одноименной фазы линии с заземленной фазой отличается от заряда симметричной линии в отношении

$$\begin{aligned} &= \frac{(C_{12} + C_{22})(\alpha - 1) + C_{23}(\alpha - \alpha^2)}{C'_{12}(\alpha - 1) + C'_{22} \cdot \alpha + C'_{23}(\alpha - \alpha^2)} = \\ &= \frac{\alpha + \frac{C'_{23}}{C_{12} + C_{22}}(\alpha - \alpha^2) - 1}{\alpha + \frac{C'_{23}}{C'_{12} + C'_{22}}(\alpha - \alpha^2) - \frac{C'_{12}}{C'_{12} + C'_{22}}}, \end{aligned}$$

причем емкости с примом относятся к симметричной линии с соответствующим расположением проводов.

Применительно к линии с расположением проводов АС—185 по рис. 8 частные емкости получают значения:

а) в случае двух цепей —

$$\begin{aligned} C_{12} &= 0,00183 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; C'_{12} = 0,00229 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; \\ C_{23} &= 0,00230 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; C'_{23} = 0,00220 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; \\ C_{22} &= 0,00312 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; C'_{22} = 0,00300 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; \end{aligned}$$

в) когда одна сторона в работе (без учета влияния проводов другой стороны)

$$\begin{aligned} C_{12} &= 0,00152 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; C'_{12} = 0,00190 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; \\ C_{23} &= 0,00187 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; C'_{23} = 0,00180 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; \\ C_{22} &= 0,00435 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; C'_{22} = 0,00425 \cdot 10^{-6} \text{ F/км}; \end{aligned}$$

и соответственно отношение зарядов:

а) в случае двух цепей—1,15

в) в случае одной цепи 1,24

Поэтому критическое напряжение короны на втором проводе линии с заземленной фазой будет ниже, чем в симметричной на 13% и 23% соответственно двухцепной и одноцепной линиям.

Выявленное свойство линии электропередачи с заземленной фазой накладывает некоторые ограничения в отношении сооружения одноцепных

цепных линий с проводами, сечения которых меньше, чем сечение провода марки АС-150.

Интересно заметить, что провод заземленной фазы коронировать не будет во всех возможных практических случаях.

VII.

Экономические выгоды перехода на систему электропередач с использованием провода одной из фаз наиболее выпукло представляются в варианте постоянного заземления провода одной из фаз. В основном они выражаются в следующем.

1) Сечение провода заземленной фазы, как правило, может быть взято в два раза меньше, чем сечения двух других фаз, т. е. фактически двухцепная линия может быть выполнена 5-ю проводами вместо обычных 6-ти проводов того же сечения.

2) Отпадает необходимость в подвеске специальных защитных тросов, т. е. экономится два троса в случае двухцепных линий на железных опорах и четыре троса в случае двухцепной линии на деревянных опорах.

3) Опоры линий, при тех же пролетах, получаются ниже на несколько метров; нагрузка от ветра на опору, в связи с отсутствием тросов, снижается; вместе взятые эти два обстоятельства, как показывают подсчеты, при соответствующих конструкциях опор дают экономию в весе опор:

- а) в случае 110 кВ железных опор $12 \div 15\%$;
- б) в случае 110 кВ деревянных опор $25 \div 30\%$;
- в) в случае 220 кВ железных опор до 50%.

На номинальное напряжение 110 кВ возможной целесообразной конструкцией железной опоры представляется опора „американского типа“ с расположением проводов обратной елкой, у которой места тросов заняты проводами заземленной фазы, а нижняя траверса исключается. На то же напряжение деревянная опора может быть выполнена двухцепной (рис. 11),

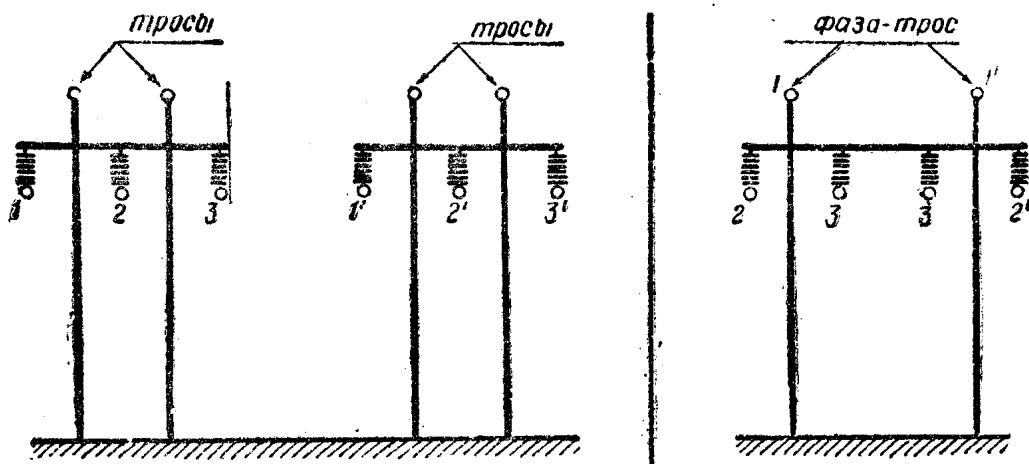


Рис. 11.

причем затруднения с ремонтом траверсы можно обойти постановкой третьей ноги в середине. В этом случае вполне будут выдержаны требования техники безопасности о возможности ремонта одной цепи, когда другая находится в работе; траверса будет выполняться составной, со стыком над средней ногой.

На номинальное напряжение 220 кВ в первом приближении можно мыслить себе одноцепные опоры типа днепровских.

• Приведенные выше цифры экономии веса опор подсчитаны применительно к указанным типам опор.

4) Экономится 25—30% линейных изоляторов; несколько меньше трети потому, что подвеска выравнивающих колец по стоимости эквивалентна усилению гирлянды, примерно, на один элемент.

5) Экономится 25—30% коммутационной аппаратуры и изоляции подстанций, так как заземленную фазу нет нужды выключать.

6) Экономится около трети по весу железных конструкций открытых подстанций, кстати, площадь, занимаемая открытыми подстанциями электропередач с заземленной фазой, меньше, примерно, в полтора раза площади, занимаемой открытыми подстанциями симметричных электропередач.

Не совсем ясно, неизбежно ли удорожание силовых трансформаторов подстанций и если неизбежно, то в какой степени. Точно также не совсем ясно, как отразится повышение рабочего потенциала $\sqrt{3}$ раза на разрывной мощности выключателей. Предварительные соображения подсказывают, что возможное удорожание трансформаторов и выключателей будет вполне перекрыто экономией по другим элементам оборудования подстанций.

На основании всего вышесказанного можно сделать следующие общие выводы.

Проблема использования провода одной из фаз и в качестве защиты от грозных ударов затрагивает большой комплекс вопросов, подлежащих детальному теоретическому и экспериментальному исследованию, но и на основании рассмотренных в настоящей работе соображений создается уверенность в возможности отказа от подвески специального защитного троса на высоковольтных линиях электропередачи и использования для целей защиты линий от грозных ударов провода одной из фаз, располагая этот провод соответствующим образом на опоре.