УДК 621.311

© Сапунков М.Л., Костарев И.А., Худяков А.А., 2012

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ,
ОСНОВАННОЙ НА КОНТРОЛЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ****М.Л. Сапунков, И.А. Костарев, А.А. Худяков****Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия**

Исследовано влияние переходного сопротивления в месте замыкания на землю на приращения пульсирующих мощностей поврежденной и неповрежденной линии в сети с изолированной и компенсированной нейтралью.

Исследование влияния переходного сопротивления проведено на основе математического описания процессов при возникновении ОЗЗ в сети. Все необходимые расчеты выполнены с использованием аналитических выражений для приращений пульсирующей мощности на линиях сети, полученных для разных вариантов заземления нейтрали. В расчетах величина R_{Π} варьировалась от 0 до 1000 Ом. Задавалась степень асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю с возможным отклонением до 20 %. Для сети с компенсированной нейтралью предполагался режим резонансной настройки компенсации.

По результатам расчетов построены кривые зависимости относительной величины приращения пульсирующей мощности от переходного сопротивления в месте ОЗЗ для двух вариантов заземления нейтрали, а именно для изолированного и компенсированного. Построенные кривые выполнены как для поврежденной, так и для неповрежденной линии. Установлено, что величина R_{Π} оказывает большее влияние на переменную составляющую мощности в сети с изолированной нейтралью по сравнению с сетью с компенсированной нейтралью.

В результате исследований установлено, что наличие переходного сопротивления в месте возникновения ОЗЗ будет существенно уменьшать контролируемые защитой сигналы. Однако достаточно высокая чувствительность датчиков тока и модулей аналогового ввода микропроцессорного устройства защиты позволит обеспечить селективность работы защиты при относительном принципе сравнения контролируемых сигналов.

Ключевые слова: сети среднего напряжения, однофазное замыкание на землю, переходное сопротивление, пульсирующая мощность, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль.

**INVESTIGATION OF TRANSITION RESISTANCE
DATA PROTECTION FOR SINGLE PHASE CIRCUITS,
BASED ON A PULSE POWER CONTROL****M.L. Sapunkov, I.A. Kostarev, A.A. Khudiakov****Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia**

The effect of transient resistance at the site of an earth fault on the increments of pulsating power lines damaged and undamaged in a network with isolated neutral and compensated ones were researched. Investigation of the effect of transient resistance was carried out on the basis of the mathematical description of processes in the erasing of O33 in the network. All necessary calculations were performed using the analytical expressions for the increments of pulsating power on the lines of the network obtained for different variants of neutral grounding.

In calculating the value of R_{Π} was varied from 0 to 1000 ohms. The degree of asymmetry of intrinsic conduction phase lines on the ground with a possible deviation of up to 20 % was determined. The mode is assumed to be resonant setting compensation for a network with a compensated neutral. According to the calculations there were constructed plots of the relative magnitude of the increment of the transition from the pulsating power of resistance in O33 for two variants of neutral grounding, namely for the isolated and compensated neutral grounding.

The constructed curves are made for both damaged and undamaged line. The values of R_{Π} has a greater effect on the variable component of the power network with isolated neutral compared to the network with a compensated neutral. The studies found that the presence of transition resistance at the scene of O33 will significantly reduce the protection of the controlled signals.

However, the relatively high sensitivity of the current sensors and analog input modules of microprocessor protection devices will provide the selectivity of protection at a relative comparison principle controlled by signals.

Keywords: medium voltage systems, line-to-earth fault, transition resistance, throbbing power, isolated neutral, compensated neutral.

Введение

Ввиду большой доли однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) среди других аварийных повреждений (70–80 %) весьма актуальной является задача разработки эффективной защиты от ОЗЗ [1, 2].

Анализ существующих защит от ОЗЗ показывает, что многие известные устройства не удовлетворяют в полной мере требованиям по селективности и надежности с учетом возможных видов замыкания на землю: устойчивого замыкания (металлического либо через переходное сопротивление), устойчивого или перемежающегося дугового замыкания. Некоторые разработки утверждают, что в настоящее время не существует универсальной защиты, которая способна однозначно определять поврежденную линию как в сети с изолированной, так и в сети с компенсированной нейтралью [3].

Как вариант решения такой проблемы авторы предлагают применение защиты от ОЗЗ, основанной на новом принципе контроля возникновения замыканий, а именно на контроле приращений пульсирующей мощности (переменной составляющей) трехфазных линий [4, 5].

Аналитические выражения для приращений пульсирующей мощности на линиях сети

Переменная составляющая суммарной мгновенной мощности трех фаз линии зависит от симметрии напряжений и симметрии токов. В случае их абсолютной симметрии переменная составляющая суммарной мгновенной мощности равна нулю. Возникновение в сети ОЗЗ обуславливает несимметрию фазных напряжений относительно земли всех линий сети. Это вызывает изменение мгновенной мощности линии на величину приращения переменной составляющей мощности. Данное обстоятельство позволяет с большой достоверностью находить поврежденную линию среди других линий распределительной сети и является опре-

деляющим фактором для создания новой селективной защиты от ОЗЗ.

Значительно усложняет возможность успешного функционирования защит от ОЗЗ наличие переходного сопротивления в месте замыкания, которое уменьшает несимметрию напряжений фаз. Величина этого сопротивления зависит в первую очередь от характера контакта поврежденной фазы с землей. Согласно [8] величина этого сопротивления в некоторых случаях может достигать 100–200 Ом и более, а в отдельных случаях, например при падении оборвавшегося провода воздушной ЛЭП на сухую или мерзлую землю, даже нескольких кОм. В связи с этим актуальной является задача оценки влияния переходного сопротивления в месте возникновения ОЗЗ на эффективность работы новой защиты.

Для проведения исследования необходимо, прежде всего, получить основные аналитические выражения для последующих расчетов. Сделано это на основании упрощенной схемы замещения сети с изолированной (или компенсированной) нейтралью, приведенной на рис. 1.

Распределительная сеть может содержать группу с числом N отходящих от секции шин линий. Любая из них может оказаться поврежденной. На рис. 1 такая линия обозначена индексом α . Одна из неповрежденных линий обозначена индексом β . Все остальные $N-2$ неповрежденные линии на рис. 1 учитываются одной так называемой «эквивалентной» линией. В общем случае режим заземления нейтрали можно характеризовать комплексной проводимостью Y_p . Частному случаю «изолированная нейтраль» будет соответствовать случай, когда $Y_p = 0$.

На основании ранее разработанной математической модели [6] выражения для комплексов приращений пульсирующей мощности поврежденной линии α и неповрежденной линии β в случае замыкания, например фазы А, можно записать в виде:

Рис. 1. Схема замещения сети с изолированной (или компенсированной) нейтралью

1) для поврежденной линии α :

$$\Delta \dot{P}_{\Pi\alpha} = \frac{g_{\Pi} \left[(Y_{C\Sigma} + \lambda \cdot Y_{CTP}) \dot{U}_{CA} - (Y_{B\Sigma} + \lambda \cdot Y_{BTP}) \dot{U}_{AB} \right]}{Y_{\Sigma} + \lambda \cdot Y_{\Sigma TP} + g_{\Pi}} \times \left[\frac{g_{\Pi}}{Y_{\Sigma} + \lambda \cdot Y_{\Sigma TP}} \times \left(Y_{A\alpha} \cdot \dot{U}_{AB} + Y_{B\alpha} \cdot \dot{U}_{BC} + Y_{C\alpha} \cdot \dot{U}_{CA} \right) - \dot{U}_{AB} \right], \quad (1)$$

2) для неповрежденной линии β :

$$\Delta \dot{P}_{\Pi\beta} = \frac{g_{\Pi} \left[(Y_{C\Sigma} + \lambda \cdot Y_{CTP}) \dot{U}_{CA} - (Y_{B\Sigma} + \lambda \cdot Y_{BTP}) \dot{U}_{AB} \right]}{(Y_{\Sigma} + \lambda \cdot Y_{\Sigma TP})(Y_{\Sigma} + \lambda \cdot Y_{\Sigma TP} + g_{\Pi})} \times (Y_{A\beta} \cdot \dot{U}_{AB} + Y_{B\beta} \cdot \dot{U}_{BC} + Y_{C\beta} \cdot \dot{U}_{CA}), \quad (2)$$

где g_{Π} – величина переходной проводимости в месте замыкания на землю, $g_{\Pi} = \frac{1}{R_{\Pi}}$; λ – безразмерная комплексная величина, введенная для краткости обозначений,

$$\lambda = \frac{Y_P}{Y_P + Y_{\Sigma TP}} = \frac{g_P^2 + b_P^2 + Y_{\Sigma TP} (g_P - j \cdot b_P)}{(Y_{\Sigma TP} + g_P)^2 + b_P^2};$$

g_P, b_P – соответственно активная и реактивная проводимости компенсирующего реактора; Y_{Σ} – суммарная проводимость фаз всех линий сети на землю, $Y_{\Sigma} = Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}$; $Y_{\Sigma TP}$ – суммарная проводимость всех фаз первичной обмотки ТрП, $Y_{\Sigma TP} = Y_{ATP} + Y_{BTP} + Y_{CTP}$; $Y_{A\Sigma}, Y_{B\Sigma}, Y_{C\Sigma}$ – суммарные проводимости фаз на землю всех N линий распределительной сети; $Y_{ATP}, Y_{BTP}, Y_{CTP}$ – проводимости фаз первичной обмотки ТрП.

В выражениях (1) и (2) режим заземления нейтрали отражается безразмерной величиной λ . В случае сети с изолированной нейтралью $\lambda = 0$.

Исследование влияния переходного сопротивления

Для проведения исследования влияния переходного сопротивления требуется рассматривать величину $\Delta P_{\Pi}^* = \Delta P_{\Pi} / \Delta P_{\Pi, \text{БАЗ}}$, которая представляет собой модуль отношения переменной составляющей мощности поврежденной (или неповрежденной) линий к базовой величине. За базовую ве-

Рис. 2. Кривые зависимости отношения ΔP_{π}^* от R_{π} в сети с изолированной (а) с компенсированной (б) нейтралью: 1 – для поврежденной линии; 2 – для неповрежденной линии

личину принимается модуль приращения пульсирующей мощности в сети с изолированной нейтралью в случае металлического замыкания ($R_{\pi} = 0$) и отсутствия асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю ($Y_{A\Sigma} = Y_{B\Sigma} = Y_{C\Sigma}$). При этом принимались следующие условия: общий ток замыкания на землю в сети составлял порядка 30 А; степень асимметрии проводимостей фаз линий – 20 % ($Y_{A\Sigma} = 0,8Y_{B\Sigma} = 1,2Y_{C\Sigma}$); в случае сети с компенсированной нейтралью принималась резонансная настройка дугогасящего реактора. Достаточным считалось рассмотреть влияние на ΔP_{π}^* переходного сопротивления в диапазоне возможных значений от 0 до 1000 Ом.

Путем варьирования величины R_{π} были проведены расчеты по выражениям (1) и (2). Далее путем отношения к базовой величине были вычислены значения ΔP_{π}^* и построены кривые зависимостей ΔP_{π}^* от R_{π} (рис. 2, а, б). В ходе анализа результатов исследования было выяснено, что при величине переходного сопротивления 10 Ом в сети с изолированной нейтралью данный параметр уменьшает сигналы на поврежденной и неповрежденной линиях максимально на 4,6 % по сравнению с сигналами на тех же линиях

при $R_{\pi} = 0$. При компенсированной нейтрали уменьшение сигналов составляет 2,4 %. Это означает, что переходное сопротивление в пределах 10 Ом мало влияет на величины приращений пульсирующих мощностей на поврежденной и неповрежденной линиях независимо от режима заземления нейтрали. Однако при значениях сопротивления порядка 100 Ом уменьшение сигнала составляет: для сети с изолированной нейтралью 28,7 %, для сети с компенсированной нейтралью 7,8 %; при $R_{\pi} = 1000$ Ом эти значения будут составлять 89,5 и 46 % соответственно.

Как видно из рис. 2, а, б, переходное сопротивление только уменьшает полезный сигнал защиты как на поврежденной, так и на неповрежденной линии. Стоит отметить, что сигнал на неповрежденной линии будет только в том случае, если имеется некоторая асимметрия собственных проводимостей фаз на землю линий сети. При симметричной сети приращение пульсирующей мощности на неповрежденной линии будет равно нулю независимо от величины переходного сопротивления.

Из полученных результатов также видно, что влияние переходного сопротивления на приращение пульсирующей мощности любой линии зависит от режима заземления нейтрали сети. Уста-

новлено, что величина R_{II} оказывает большее влияние на переменную составляющую мощности в сети с изолированной нейтралью по сравнению с сетью с компенсированной нейтралью.

Защита, основанная на контроле пульсирующей мощности, может работать по двум алгоритмам: сравнение сигнала с заданной уставкой (абсолютный принцип) и сравнение между собой приращений пульсирующих мощностей всех защищаемых линий (относительный принцип). В случае работы новой защиты по относительному принципу критерием оценки возможности успешного функционирования защиты является кратность величин сигналов на поврежденной и неповрежденной линиях. В результате исследования выявлено, что

отношение $\Delta P_{II\alpha} / \Delta P_{II\beta}$ не зависит от величины переходного сопротивления.

Заключение

Таким образом, установлено, что наличие переходного сопротивления в месте замыкания на землю не будет влиять на селективность работы защиты, основанной на контроле пульсирующей мощности. Большая величина переходного сопротивления будет обуславливать необходимость применения высокочувствительных датчиков тока и модулей аналогового ввода для обработки первичных сигналов, так как приращения пульсирующих мощностей отдельных линий в значительной степени зависят от величины переходного сопротивления.

Список литературы

1. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / НТФ «Энергопрогресс». – М., 2001. – 104 с.
2. Шалин А.И. Релейная защита от замыканий на землю в сетях с резистивным заземлением нейтрали // Ограничение перенапряжений: материалы 4-й Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2004.
3. Езерский В.Г. Комбинированная защита от однофазных замыканий на землю // Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6–35 кВ: тр. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2006.
4. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Разработка селективной защиты от однофазных замыканий на землю для распределительных сетей 6–10 кВ // Энергетика. Инновационные направления в энергетике: материалы 3-й Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010.
5. Способ защиты трехфазной сети от однофазных замыканий на землю: пат. № 2309507 Рос. Федерация / М.Л. Сапунков, Л.М. Сапунков. Опубл. 27.10.2007. Бюл. № 30.
6. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Исследование на физической модели распределительной сети характеристик защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на контроле пульсирующей мощности // XVI Бенардосовские чтения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 1–3 июня 2011 г. – Иваново, 2011.
7. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
8. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Характеристики, особенности применения // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36).
9. Худяков А.А., Сапунков М.Л. Исследование влияния асимметрии провод. фаз линий на землю на функционирования защиты от ОЗЗ // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4, № 2.
10. Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87).
11. Roberts J., Altuve H., Hou D. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems / Schweitzer Engineering Laboratories. – Inc. Pullman, WA USA.

12. New directional ground fault elements improve sensitivity in ungrounded and compensated networks // Schweitzer Engineering Laboratories / J. Roberts, D. Hou, F. Calero, H. Altuve. – Inc. Pullman, WA USA.

13. Lorenc J., Musierowicz K., Kwapisz A. Detection of the intermittent earth faults in compensated MV Network // IEEE Bologna Power tech Conference. – June 23–26 2003.

14. Zielichowski M., Fulczyk M. Ground-fault overvoltage danger in modern unit-connected generators // IEEE power. – 2002. – Vol. 2.

15. Willems J.L., Ghijselen J.A. Apparent power and power factor concepts in unbalanced and nonsinusoidal situations // IEEE Bologna powertech conference. – 2003.

References

1. Shuin V.A., Gusenkov A.V. Zashity ot zamykaniĭ na zemliu v elektricheskikh setiakh 6–10 kV [Protection against ground faults in networks 6–10 kV]. Moscow: Energoprogress, 2001. 104 s.

2. Shalin A.I. Releĭnaia zashchita ot zamykaniĭ na zemliu v setiakh s rezistivnym zazemleniem neĭtrali [Relay protection against ground faults in networks with resistor earthed neutral]. 4th vseros. nauch.-tekhn. konf. "Ogranichenie perenapriazheniĭ", Novosibirsk, 2004.

3. Ezerskiĭ V.G. Kombinirovannaia zashchita ot odnofaznykh zamykaniĭ na zemliu Ogranichenie perenapriazheniĭ. Rezhimy zazemleniia neĭtrali. Elektrooborudovanie setei 6–35 kV [Relay protection against ground faults in networks with resistor earthed neutral // limit surge]. 4th vseros. nauch.-tekhn. konf. "Ogranichenie perenapriazheniĭ", Novosibirsk, 2006.

4. Sapunkov M.L., Khudiakov A.A. Razrabotka selektivnoi zashchity ot odnofaznykh zamykaniĭ na zemliu dlia raspredelitel'nykh setei 6–10 kV [The development of selective anti-phase to ground fault distribution networks 6–10 kV]. *Energetika. Innovatsionnye napravleniia v energetike: 3rd vseros. nauch.-tekhn. konf.*, Perm, 2010.

5. Sapunkov M.L. Sposob zashchity trekhfaznoi seti ot odnofaznykh zamykaniĭ na zemliu [Method of protecting a three-phase network of single-phase earth fault]. Pat. №2309507 Ros. Federatsiia.

6. Sapunkov M.L., Khudiakov A.A. Issledovanie na fizicheskoi modeli raspredelitel'noi seti kharakteristik zashchity ot odnofaznykh zamykaniĭ na zemliu, osnovannoĭ na kontrole pul'siruiushcheĭ moshchnosti [Investigation of the physical model of the distribution network security features of the single-phase earth fault, based on the control of pulsatile power]. 16th Benardosovskie chteniia: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Ivanovo, 2011.

7. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Osnovy teorii tsepei: uchebnik dlia vuzov [Fundamentals of circuit theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 528 s.

8. Shalin A.I. Zamykaniia na zemliu v setiakh 6–35 kV. Napravlennye zashchity. Kharakteristiki, osobennosti primeneniia [Earth fault in networks 6–35 kV. Directional protection. Characteristics features of]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, no.6 (36).

9. Khudiakov A.A., Sapunkov M.L. Issledovanie vliianiia asimmetrii provod. faz liniĭ na zemliu na funktsionirovaniia zashchity ot OZZ [Investigation of the effect of asymmetry wire. phase lines on the ground in the functioning of the anti-PTG]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii*, 2010, Vol. 4, no. 2.

10. RD 34.20.179 Tipovaia instruktsiia po kompensatsii iomkostnogo toka zamykaniia na zemliu v elektricheskikh setiakh 6–35 kV [Typical instructions for the compensation of the capacitive earth fault currents in electrical networks 6–35 kV] (TI 34-70-070-87).

11. Roberts J., Altuve H., Hou D. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems. Schweitzer Engineering Laboratories. WA USA: Inc. Pullman.

12. Roberts J., Hou D., Calero F., Altuve H. New directional ground fault elements improve sensitivity in ungrounded and compensated networks. Schweitzer Engineering Laboratories. WA USA: Inc. Pullman.

13. Lorenc J., Musierowicz K., Kwapisz A. Detection of the intermittent earth faults in compensated MV Network. IEEE Bologna Power tech Conference, 2003.

14. Zielichowski M., Fulczyk M. Ground-fault overvoltage danger in modern unit-connected generators. *IEEE power*, 2002, Vol. 2.

15. Willems J.L., Ghijselen J.A. Apparent power and power factor concepts in unbalanced and nonsinusoidal situations. *IEEE Bologna powertech conference*, 2003.

Об авторах

Сапунков Михаил Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: ilya_kost@mail.ru).

Костарев Илья Андреевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: ilya_kost@mail.ru).

Худяков Антон Александрович (Пермь, Россия) – ассистент кафедры электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: akhudyakov@mail.ru).

About the authors

Sapunkov Mikhail L. (Perm, Russia) – Ph.D., professor of department for electrification and delfts automation, Perm national research polytechnic university (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: ilya_kost@mail.ru).

Kostarev Ilya A. (Perm, Russia) – teaching assistant of department for electrification and delfts automation, Perm national research polytechnic university (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: ilya_kost@mail.ru).

Khudiakov Anton A. (Perm, Russia) – teaching assistant of department for electrification and delfts automation, Perm national research polytechnic university (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: akhudyakov@mail.ru).

Получено 10.05.2012