

А. Ф. ЖАРКИН, д-р техн. наук, чл.-корр. НАН Украины, зам. директора, Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
В. А. НОВСКИЙ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
Н. Н. КАПЛЫЧНЫЙ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
А. В. КОЗЛОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электродинамики НАН Украины, Киев

КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭМС И ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С СИСТЕМОЙ ЗАЗЕМЛЕНИЯ «TN-C-S»

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень комплексного забезпечення ЕМС та електробезпеки споживачів електроенергії, а також підвищення її якості в низьковольтних електричних мережах за допомогою фільтрів струму нульової послідовності.

The results of theoretical and experimental research to provide comprehensive EMC and electrosafety of electrical power consumers, as well as improving its quality in low-voltage electrical networks using the developed filters, the zero sequence current.

В настоящее время в связи с большой насыщенностью электрических сетей низкого напряжения (НН) современными (одно- и трехфазными) электроприемниками (ЭП) достаточно большой мощности и отличающихся несинусоидальной формой потребляемого тока становятся актуальными задачи обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и выполнения обязательных требований электробезопасности потребителей указанных сетей. Большинство находящихся в эксплуатации распределительных сетей НН в Украине построены с использованием системы защитного заземления TN-C [1]. Такая сеть обычно состоит из питающего трансформатора (ПТ), трех фазных проводников и объединенного PEN-проводника, совмещающего в себе функции нейтрального (N) и защитного (PE) проводников. Однако такая система построения электрических сетей НН не позволяет в должной мере удовлетворить повышенные требованиям эксплуатации потребителей электроэнергетики, которые подключаются к указанным электрическим сетям.

В соответствии с требованиями стандартов МЭК серии 60364 вопросы обеспечения ЭМС, улучшения качества электроэнергии (КЭ) и электробезопасности потребителей низковольтных сетей могут быть в целом решены благодаря использованию систем заземления TN-S и TN-C-S, а также за счет проведения ряда мероприятий по выравниванию потенциала PEN-проводника по всей его длине на протяжении питающей линии. Указанные системы

заземления различаются режимами работы N- и PE-проводников, поскольку в системе TN-S разделение на N- и PE-проводники производится по всей сети, а в системе TN-C-S такое разделение осуществляется только в определенной ее части. Применение системы TN-C-S в Украине считается наиболее перспективным, так как не требует коренной реконструкции распределительной сети НН и, соответственно, увеличения материальных затрат. В этом случае разделение общего PEN-проводника на N- и PE-проводники производится обычно в месте присоединения ответвления к основной магистрали (например, ввод в здание, ответвление на объект, использующий трехфазное напряжение и др.). При этом металлические корпуса однофазных и трехфазных ЭП заземляются с помощью PE-проводника непосредственно и/или через «трехполюсные» розетки (так называемые «евророзетки»), снабженные дополнительным заземляющим контактом с целью обеспечения электробезопасности в отношении возможного поражения людей электрическим током.

Установлено, что распределительные сети, которые конструктивно выполнены по системе TN-C-S, не всегда соответствуют требованиям обеспечения высоких уровней ЭМС и электробезопасности в электроустановках жилых зданий и иных объектов. В частности, в таких сетях заведомо предполагаются пониженные нормы КЭ, обусловленные отклонениями и несинусоидальностью напряжений, а также провалами и импульсными перенапряжениями в питающей сети, которые обусловлены несимметрией нагрузок, а также их нелинейным характером и резкопеременным изменением во времени мощности ЭП. Особенно остро это проявляется в протяженных низковольтных сетях, где имеется достаточно большое количество однофазных ЭП, являющихся источниками токов высших гармоник. В трехфазных четырехпроводных сетях эти токи с частотами гармоник, кратных трем, являются токами нулевой последовательности (НП) и суммируются в PEN-проводнике сети. В результате значение тока в нейтральном проводе может превышать в несколько раз значения фазных токов, что вызывает увеличение дополнительных потерь электроэнергии и значительный перегрев PEN проводника [2]. Кроме того, указанные токи высших гармоник приводят к искажениям формы кривых питающих напряжений, вызывая повышение уровней кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП) и, тем самым, способствуют нарушению условий обеспечения ЭМС потребителей сети.

Исследования показали, что с точки зрения электробезопасности важное значение приобретает распределение уровня напряжения НП вдоль длины отходящей от ПТ линии. В наиболее простом случае, когда нагрузка сосредоточена в конце линии, напряжение НП распределяется пропорционально изменению значения сопротивления НП и монотонно возрастает по мере удаления от места расположения питающего трансформатора [3]. При существенном увеличении значения напряжения НП (напряжение смещения нейтрали) необходимо осуществить мероприятия по выравниванию потенциала PEN-проводника по всей его длине. В соответствии с рекомендациями ПУЭ

таковым, в частности, является устройство ряда повторных заземлений. В то же время наличие повторного заземления, способствуя улучшению КЭ, не решает в должной мере вопросы электробезопасности эксплуатации электрической сети.

В нормальных режимах работы системы заземления TN-C-S токи по РЕ-проводнику не протекают, при этом опасные потенциалы на металлических корпусах электрооборудования не возникают, а при возникновении различного рода утечек необходимый уровень электробезопасности обеспечивают устройства защитного отключения (УЗО). Однако в аварийных режимах, связанных с нарушением конфигурации сети, например, в случае обрыва PEN-проводника на магистральной линии или ответвлении, а также короткого замыкания (КЗ) между фазным и нулевым (N) проводниками система TN-C-S утрачивает свою работоспособность и становится даже электроопасной. Особенно остро это проявляется в протяженных и разветвленных распределительных сетях, где электроснабжение потребителей осуществляется с помощью воздушных линий (ВЛ) напряжением 0,4 кВ. Так при обрыве PEN-проводника и КЗ на корпус в таких сетях на всех металлических корпусах ЭП, присоединенных к РЕ-проводнику (то есть включенных в «евророзетки»), появляется смертельно опасный потенциал фазы. Наличие в этом месте повторного заземления, имеющего относительно большую величину сопротивления (согласно ПУЭ не менее 10 Ом), позволяет снизить этот потенциал, но не устраняет его полностью [4].

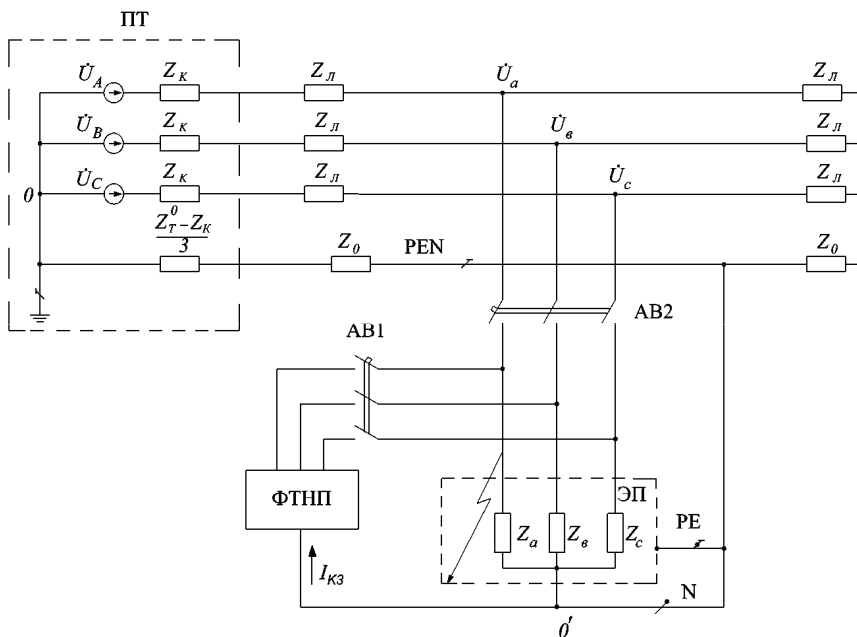
Для того, чтобы низковольтная сеть на должном уровне удовлетворяла требованиям как по нормам КЭ в соответствии с межгосударственным (стран СНГ) стандартом ГОСТ 13109-97, так и электробезопасности необходимо проводить дополнительные мероприятия с помощью применения соответствующих технических средств [5]. В частности, перспективным путем для реализации этой цели является использование так называемых корректирующих устройств (КУ), которые позволяют улучшить функциональные характеристики сети на определенном ее участке. Результаты длительных экспериментальных исследований, проведенных в ИЭД НАН Украины, показывают, что наиболее эффективным является использование в местах сосредоточенных нагрузок, где обычно возникает эмиссия токов НП, фильтров токов НП и высших гармоник, кратных трем. Установлено, что оптимальной структурой фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) является схема трехфазного филтросимметрирующего устройства с электромагнитными связями, шесть полуобмоток возбуждающей обмотки которого включены по схеме «встречный зигзаг». Указанное соединение обмоток обеспечивает эффект одновременного уравнивания системы напряжений и улучшения их гармонического состава в четырехпроводной сети. Это объясняется тем, что такой ФТНП имеет большое сопротивление (несколько сотен Ом) для токов прямой и обратной последовательностей и очень малое (сотые доли Ом) для токов НП. Поскольку на каждом стержне трехстержневого

магнитопровода ФТНП размещены половины обмоток различных фаз с одинаковым числом витков, то по каждой полуобмотке ФТНП протекают одинаковые и противоположно направленные токи. Между намагничивающими силами, создаваемыми этими токами на каждом стержне магнитопровода, устанавливается равновесие, а реактивное сопротивление НП определяется только небольшими потоками рассеяния. В этом случае сопротивление ФТНП для токов НП $Z_{ФТНП}^o$ определяется в основном омическим сопротивлением обмоток. Обладая высокой проводимостью для токов нулевой последовательности, ФТНП обеспечивает незначительное смещение (2...4 В) нейтральной точки системы напряжений нагрузки и, соответственно, небольшие потери напряжения, а также высокую пропускную способность сети при несимметрии нагрузки. В результате неуравновешенность системы напряжений, подводимых к ЭП, значительно уменьшается [3]. Установка ФТНП в месте трехфазного ответвления, питающего восприимчивые к ЭМП электроприемники с повышенными требованиями к КЭ, позволяет уравновесить систему напряжений и снизить дополнительные потери энергии в сети, а также уменьшить искажения формы кривых напряжений на нагрузке и снизить уровень кондуктивных ЭМП. При этом сохраняется работоспособность ФТНП в ненормальных режимах, к которым относятся симметричные и несимметричные КЗ, а также режимах работы, связанных с нарушением целостности конфигурации участка сети, например, в случаях обрыва нейтральных или фазных проводников.

Рассмотрим некоторые практические аспекты использования ФТНП, установленного в месте трехфазного ответвления, например, на вводе объекта или жилого здания. Отметим, что вопросы защиты от поражения электрическим током на других ответвлениях и основной магистральной линии требуют отдельного исследования.

На рисунке представлена схема участка трехфазной четырехпроводной сети, состоящей из ПТ, представленного в виде трех источников напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, которые соединены в «звезду с нулем», а также сопротивлений Z_K и $(Z_T^o - Z_K)/3$, где Z_K и Z_T^o – сопротивления КЗ и НП трансформатора. Здесь также показаны сопротивления Z_L трех фазных проводов и сопротивление Z_O PEN-проводника, а также сопротивления Z_a, Z_b, Z_c нагрузки трехфазного ответвления. Нулевая точка $0'$ нагрузки с помощью рабочего N-проводника, а корпус ЭП – через защитный PE-проводник соединены с PEN-проводником сети. На схеме показан вариант присоединения ФТНП через автоматический выключатель АВ1 параллельно нагрузке трехфазного ответвления которая подключена к сети через АВ2.

Для разработки технико-экономического обоснования и проведения анализа эффективности практического применения ФТНП для указанных целей были исследованы различные виды длительных и кратковременных ненормальных, аварийных и послеаварийных режимов работы рассматриваемого



участка низковольтной сети, в частности, одно- и двухфазные, трехфазные КЗ на зажимах нагрузки (в месте установки ФТНП), а также обрывы линейных проводов перед местом установки ФТНП и др. Например, в случае КЗ «фаза-нуль» на нагрузке в фазе А при оборванном PEN-проводнике в питающей магистрали ток КЗ $\dot{I}_{КЗ} = \dot{I}_{ФТНП}$ будет замыкаться не через PEN-проводник, а через весьма малое сопротивление $Z_{ФТНП}^0$. При правильно спроектированном участке сети трехфазного ответвления и магистральной сети величина тока КЗ при этом будет вполне достаточной для того, чтобы сработал автоматический выключатель сети (максимальная токовая отсечка) и за нормируемое ПУЭ время (менее 0,4 секунды) отключил ЭП от сети. В случае обрыва одного из фазных проводников магистральной линии, отходящей от трансформаторной подстанции, например, в фазе А при наличии ФТНП на нагрузке ответвления в этой фазе будет поддерживаться напряжение, близкое по модулю и фазе к напряжению, которое было на нагрузке до обрыва. При этом на нагрузке ответвления сформируется трехфазная система напряжений, которая за счет смещения нейтрали будет несколько отличаться от первоначальной (то есть до обрыва магистрального проводника в фазе А). Отличие определяется величинами сопротивлений нулевой последовательности ПТ и ФТНП, которые при изменении конфигурации сети оказываются включенными в цепь питания нагрузки фазы А. В результате при правильном выборе параметров элементов сети и ФТНП на связанных РЕ-

проводником металлических корпусах ЭП возможно появление небольшого остаточного напряжения, которое может составить лишь (8...10) % номинального напряжения сети, т.е. сохранятся практически безопасные потенциалы, имевшие место до аварийного режима.

В результате проведенного анализа электромагнитных процессов в нагрузочном узле с ФТНП при ненормальных и аварийных режимах установлено, что наибольший ток, протекающий через ФТНП, равен примерно третьей части значения тока одно- или двухфазного КЗ на нагрузке; при обрыве линейного провода перед ФТНП через него протекает ток, равный геометрической сумме токов фаз сети, оставшихся под напряжением. Максимальный ток протекает через ФТНП в случае, когда последний установлен вблизи ПТ и в этом месте возникло несимметричное КЗ. Данный случай должен быть взят за основу при расчете ФТНП на динамическую и термическую устойчивость.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод об имеющейся в настоящее время возможности использования разработанных авторами ФТНП в качестве альтернативного технического средства для комплексного обеспечения ЭМС и повышения КЭ в узлах нагрузки, а также электробезопасности потребителей в распределительных сетях НН. Последнее достигается за счет улучшения защитных свойств сети с рекомендованной и широко внедряемой в последнее время в Украине системой заземления TN-C-S. При этом вероятность поражения людей электрическим током при прикосновениях к токопроводящим корпусам заземленных бытовых приборов и электрооборудования существенно снижается даже при обрыве PEN-проводника.

Таким образом, в тех случаях когда материальные затраты на установку ФТНП не являются основным фактором, а необходимость обеспечения высокого КЭ у потребителей и защиты различного электрооборудования от кондуктивных ЭМП, а также достижения высоких уровней электробезопасности является определяющим, данный комплексный подход представляется вполне оправданным. В этом случае имеется реальная возможность в условиях протяженной сети НН зачастую с неудовлетворительным КЭ организовать локальный участок сети с высоким КЭ и повышенной надежностью электроснабжения восприимчивых к электромагнитным помехам ЭП при одновременном обеспечении требований ПУЭ к электробезопасности. Необходимо подчеркнуть, что указанные преимущества предложенного комплексного подхода при применении ФТНП в нагрузочном узле достигаются в ненормальных и аварийных режимах работы низковольтной распределительной сети.

Список литературы: 1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. перераб. и доп. – Харьков: изд-во «Форт», 2009. – 708 с. 2. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – Киев: Наукова думка, 2005. – 210 с. 3. Шидловский А.К., Новский В.О., Капличный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределитель-

ных сетях. – Киев: Наукова думка, 1989. –312 с. 4. *Жарков В.Я* Новая система заземления в сети 380 В: за и против // Электрические сети и системы. – 2005. – № 3. – С. 13-18. 5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине 01.01.2000.– (Межгосударственный стандарт).

Поступила в редколлегию 10.06.2010.