

УДК 321.316
Шифр специальности ВАК 2.4.2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗНАЧИМОСТИ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИОРИТЕТА ПЕРЕВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–10 кВ НА РЕЖИМ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

В статье рассматривается проблема выбора очередности перевода подстанций электрических сетей 6–10 кВ на режим низкоомного резистивного заземления нейтрали, что позволит обеспечить надежность электроснабжения, селективность защит от однофазных замыканий на землю и снижение затрат на ремонт оборудования. Разработан подход к ранжированию списка подстанций на основе комплексного показателя приоритета, учитывающего семь единичных технико-экономических показателей, с учетом их весовых коэффициентов значимости. Для их оценки применен метод парного сравнения показателей на основе вербально-числовой шкалы Саати. Подход позволяет гибко адаптироваться к реальным условиям эксплуатации и может быть использован для приоритизации различных электросетевых объектов.



Источник фото: фотобанк ПАО «Россети»

АВТОРЫ:
Д.Б. Гвоздев¹, д.т.н., профессор, gvozdev-db@fskees.ru
А.А. Королев², korolyov-aa@fskees.ru
А.М. Григоров³, аспирант, Grigorov.andrey1@yandex.ru
Д.А. Устинов³, к.т.н., доцент, ORCID ID 0000-0002-1302-0743, Ustinov_DA@pers.spmi.ru
А.А. Пугачёв⁴, к.т.н., доцент, aap@energan.ru
А.Н. Назарычев³, д.т.н., профессор, ORCID ID 0000-0001-6223-4150, nazarychev_an@pers.spmi.ru
¹ Филиал ПАО «Россети» — МЭС Центра, г. Москва, РФ
² ПАО «Россети», г. Москва, РФ
³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург, РФ
⁴ ООО «Энерган», г. Санкт-Петербург, РФ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#резистивное заземление нейтрали;
#распределительные сети; #однофазное замыкание на землю; #показатель приоритета; #весовые коэффициенты; #метод парных сравнений; #шкала Саати; #надежность; #реконструкция сетей

↓ **ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Гвоздев Д.Б., Королев А.А., Григоров А.М., Устинов Д.А., Пугачёв А.А., Назарычев А.Н. Определение весовых коэффициентов значимости при вычислении комплексного показателя приоритета перевода электрических сетей 6–10 кВ на режим резистивного заземления нейтрали // Энергия единой сети. 2026. № 3–4 (82). С. 46–53.



ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эксплуатационной надежности распределительных электрических сетей 6–10 кВ остается одной из главных задач современного развития систем электроснабжения (СЭС). Значительная часть электрооборудования СЭС в России имеет высокий уровень износа (до 50 % от общего количества) и часто продолжает эксплуатироваться сверх установленных сроков службы. Отсутствие достаточного уровня инвестиций и стимулирующих мер поддержки в ряде регионов страны привело к отставанию темпов технического перевооружения электрических сетей. Существенную часть оборудования составляет зарубежная техника, которую в нынешних условиях сложно обслуживать и практически невозможно приобрести вновь. При этом в последние годы наблюдается фокус на импортозамещение, в связи с чем происходит постепенное развитие энергетической промышленности и увеличение доли отечественного электрооборудования, которое устанавливается в СЭС электротехнических комплексов. Однако доля изношенного оборудования является слишком серьезной, чтобы решить эту проблему в течение короткого времени. Требуется постепенное техническое перевооружение и модернизация — в первую очередь на самых ответственных направлениях развития СЭС в городах и промышленных предприятиях. Одним из ключевых и актуальных вопросов при проектировании, эксплуатации, реконструкции и техническом перевооружении электрических сетей 6–10 кВ является выбор режима заземления нейтрали.

РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СЕТЯХ 6–10 кВ

Подавляющее большинство распределительных сетей 6–10 кВ в России имеет изолированный режим заземления нейтрали, что обусловлено рядом преимуществ: более низкой стоимостью из-за отсутствия потребности в дополнительном оборудовании; возможностью не отключать потребителей электроэнергии в случае однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. При таком режиме ток ОЗЗ обусловлен только собственным емкостным током рассматриваемой сети и, как правило, сам по себе не представляет существенной опасности для системы электроснабжения в целом, что исторически в условиях начала индустриализации оказывало существенное влияние на его выбор. Однако режим изолированной нейтрали имеет также существенные недостатки, в числе которых:

- возникновение дуговых перенапряжений при ОЗЗ из-за постоянных зажиганий и погасаний дуги;
- высокая сложность обнаружения места повреждения при ОЗЗ;
- неселективная работа релейной защиты;
- опасность поражения электрическим током персонала в сетях с воздушными линиями электропередачи;
- возникновение феррорезонансных явлений.

Вышеперечисленные недостатки привели к тому, что данный вид заземления нейтрали в сетях среднего класса напряжения 6–10 кВ практически не используется

в большинстве зарубежных стран, за исключением небольшого количества стран, в которых использование изолированной нейтрали обусловлено, например, географическим положением, как у Финляндии. Второе место по распространению в России занимает режим работы сетей 6–10 кВ с компенсированной нейтралью, когда используется дугогасящий реактор (ДГР). Установка ДГР с высококачественной системой управления позволяет в очень малый промежуток времени настроить реактор на резонанс и снизить ток ОЗЗ практически до нуля, что устраняет все негативные факторы, которые возникают при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью [2, 3]. Для эффективной компенсации необходимо наличие хорошо отлаженной системы управления, которая будет способна настроить ДГР в резонанс за короткое время. Помимо этого, даже если ток ОЗЗ снизится практически до нуля, устойчивое замыкание не сможет самоустраниться. При этом поиск места повреждения становится еще более трудной задачей ввиду снижения и без того малого тока ОЗЗ. Снижение тока не гарантирует безопасность персонала: если замыкание не будет устранено, то в любом случае существует вероятность попадания персонала под шаговое напряжение [4]. С относительно недавнего времени в России активно применяется заземление нейтрали через резистор. Такой вид заземления можно разделить на две группы в зависимости от собственного емкостного тока конкретной сети [5]:

1. Заземление через высокоомный резистор, который будет создавать относительно маленькую составляющую активного тока, протекающую через поврежденный участок, на котором произошло ОЗЗ. Как правило, суммарный ток, который включает составляющую собственного емкостного тока сети и активную составляющую, будет не больше 10 А. Такой ток не представляет существенной опасности для распределительной электрической сети. Поэтому нет необходимости отключать его за короткое время. Активная же составляющая, добавляемая резистором, позволит при этом устранить такие негативные факторы, как феррорезонансные явления, перенапряжения, перемежающуюся дугу и другие [6].
2. Заземление нейтрали через низкоомный резистор. В этом случае сопротивление резистора довольно малое, поэтому активная составляющая, которая протекает через поврежденное место, имеет уже намного большую величину по сравнению с предыдущим вариантом — то есть существенно превышает 10 А. Такой вид заземления позволяет селективно отключать присоединение, на котором произошло ОЗЗ, за наименьшее время.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–20 кВ КРУПНЫХ ГОРОДОВ

В крупных городах, таких как Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург и других, развитие распределительных сетей представляет собой тесно связанную своими центрами питания энергетическую систему. Помимо того, что соединение между собой центров

питания, электростанций, трансформаторных подстанций позволяет осуществлять различные перетоки мощности, оно также обеспечивает резервирование потребителей, очень часто даже в тех случаях, если конкретные потребители относятся ко второй или даже к третьей категории надежности. В таких случаях резервирование осуществляется не только на среднем уровне напряжения — за счет использования, например, системы сборных шин, двух силовых трансформаторов, секционного выключателя с наличием АВР, — но и на высоком уровне напряжения 110 кВ и выше, за счет питания подстанций сразу несколькими (как минимум двумя) высоковольтными воздушными и кабельными линиями [7].

С учетом вышеизложенного прекращение питания потребителей становится крайне маловероятным из-за большого количества резервных источников. Поэтому в таких распределительных сетях 6–20 кВ крупных городов нет острой потребности «держать» однофазные замыкания на землю. Существующие защиты от ОЗЗ в таких сетях работают некачественно [8]. Основным способом поиска ОЗЗ по-прежнему остается поочередное отключение присоединений на секции шин. При этом всегда существует вероятность перехода ОЗЗ в межфазные короткие замыкания, которые сопровождаются огромными токами, способными повреждать большое количество электрооборудования и приводить к существенному снижению срока его службы.

В таких сетях все активнее применяется резистивное заземление нейтрали — а именно, ее заземление через низкоомный резистор. Причиной такого решения является тот факт, что селективное быстрое отключение поврежденного присоединения не влияет на питание остальных присоединений, так как отключено будет только поврежденное присоединение, а остальные потребители, в случае необходимости, перейдут на питание от резервного источника. Тогда исключается вероятность перехода ОЗЗ в межфазные короткие замыкания и, как следствие, отключения, например, всех секций сборной шины на подстанции, а также исключается возможность повреждения оборудования соседних присоединений.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ

Ввиду ограниченности инвестиций в реконструкцию, развитие и строительство распределительных сетей 6–20 кВ, а также технической невозможности осуществить изменение режима заземления нейтрали на резистивное сразу на всех секциях шин всех подстанций (так как это потребовало бы отключения всех потребителей), процесс изменения режима заземления является последовательным и включается в инвестиционную программу с разными сроками реализации.

Главным вопросом при постепенном переводе подстанций на резистивное заземление является вопрос приоритизации (ранжирования) подстанций — то есть определение очередности их перевода на режим низкоомного заземления нейтрали.

Существуют различные критерии, согласно которым можно распределять подстанции по порядку перевода на резистивное заземление нейтрали. Например, распределить подстанции можно на основании критерия, основанного только на экономической целесообразности. Этот критерий может учитывать финансовые затраты, связанные с переводом на резистивное заземление. Согласно этому критерию, в первую очередь изменению режима заземления подлежат подстанции, для которых такие затраты — основную часть которых составляют капитальные вложения — минимальны. Также этот критерий может учитывать экономический эффект от перевода на резистивное заземление. Так как ОЗЗ будет отключаться за минимально возможное время, это исключает возможность повреждения основного электрооборудования, поэтому финансовые затраты на его ремонт снизятся. Для такого случая можно рассчитать чистый дисконтированный доход (ЧДД) и определить срок окупаемости перевода на резистивное заземление нейтрали, а подстанции, имеющие наименьший срок окупаемости, будут подлежать переводу на резистивное заземление в первую очередь [9].

С другой стороны, наименьшие затраты на изменение режима заземления нейтрали будут у тех подстанций, на которых, например, относительно недавно была произведена реконструкция и установлено новое оборудование. На такой подстанции расходование ресурса основного электрооборудования будет минимальным, и количество аварийных отключений, включая ОЗЗ, — тоже. Для перевода на резистивное заземление необходимо приобрести минимальное количество нового оборудования, поэтому и финансовые затраты будут минимальными. Надежность такой подстанции достаточно высока, и по критерию надежности нет необходимости переводить ее на резистивное заземление в первую очередь, так как повреждения на ней происходят редко [10].

Можно сказать, что не существует одного универсального критерия, по которому можно было бы определить очередность перевода подстанций на низкоомное резистивное заземление нейтрали. В одной ситуации экономическая целесообразность является определяющим фактором, а в другой — гораздо важнее учитывать повреждаемость распределительных сетей, и, следовательно, более важным оказывается критерий надежности. Также возможны ситуации, когда на подстанции отсутствует автоматический ввод резерва (АВР). В этом случае использовать резистивное заземление нецелесообразно, так как при ОЗЗ питание не будет сразу восстановлено из-за отсутствия АВР, и на некоторое время потребители останутся без электроснабжения.

ВЫБОР ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗНАЧИМОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОРЯДКА ПЕРЕВОДА ПОДСТАНЦИЙ НА РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Для определения очередности перевода подстанций на резистивное заземление нейтрали предлагается использовать комплексный показатель приоритета,

который мог бы учитывать большое количество различных критериев. Каждый единичный детализированный критерий будет обладать своим весовым коэффициентом, показывающим важность критерия по сравнению с остальными.

Предлагается использовать метод парного сравнения, который позволил бы определять весовые коэффициенты значимости для различных ситуаций. Такой метод должен быть универсальным и учитывать различные ситуации — например, с несколькими критериями, обладающими одинаковой степенью важности. За основу предлагается взять работу [11], в которой рассмотрены основные подходы к парному сравнению различных критериев, определению и оценке весовых коэффициентов, а также описаны характерные для этого метода закономерности. Кроме того, в работе отмечена возможность практического применения данного метода для реальных систем.

Всего в работе рассматриваются восемь различных методов парного сравнения, которые основаны на одних и тех же закономерностях, но при этом отличаются формулами расчета весовых коэффициентов.

Для определения очередности перевода подстанций на резистивное заземление нейтрали весовые коэффициенты каждого критерия могут рассчитываться по-разному — в зависимости от выбранного метода. Необходимо исключить те подходы, которые нельзя использовать ввиду наличия каких-либо недостатков. Перечислим основные требования, которым должен отвечать выбираемый подход к определению очередности перевода подстанций распределительных сетей на резистивное заземление нейтрали:

- выбираемый подход должен иметь возможность учета ситуации, когда два или несколько критериев обладают одинаковой степенью важности и из них нельзя выбрать наиболее важный, поэтому весовые коэффициенты таких критериев должны иметь одинаковые значения;
- выбираемый подход должен позволять учитывать значимость отдельных критериев, повышая их весовые коэффициенты настолько, чтобы вклад остальных критериев становился пренебрежимо малым и не оказывал заметного влияния на итоговое значение комплексного показателя приоритета;
- выбираемый подход должен быть применимым в реальных системах.

Из указанных в работе [11] восьми методов первые шесть из них основаны на том, что все рассматриваемые критерии являются членами убывающей арифметической прогрессии. Весовые коэффициенты критериев при использовании этих методов будут равномерно убывать от критерия, обладающего наибольшим весовым коэффициентом, до критерия, обладающего наименьшим весовым коэффициентом. Такие подходы не позволяют учесть ситуации, когда два или более критерия в силу тех или иных причин имеют одинаковую степень важности и, следовательно, одинаковый весовой коэффициент значимости.

Кроме того, первые шесть критериев [11], как уже было сказано, являются членами арифметической

прогрессии, поэтому разница весовых коэффициентов между двумя соседними по степени важности критериями является постоянной величиной. В таких подходах нельзя реализовать ситуацию, когда, например, два критерия будут иметь суммарный весовой коэффициент значимости 0,9: эти критерии гораздо важнее, чем оставшиеся 6, суммарный весовой коэффициент значимости которых будет равен 0,1 ввиду их низкой значимости. Рассмотренные шесть подходов из восьми не позволяют реализовать такую ситуацию.

Рассмотрим также восьмой подход из работы [11]. Он основан на экспоненциальном плавающем предпочтении, которое использует мультипликативный метод анализа иерархий [12]. Указанный подход, в отличие от первых шести, позволяет учесть ситуации с двумя или несколькими критериями, обладающими одинаковой степенью важности и аналогичными весовыми коэффициентами. Кроме того, последний подход позволяет также учитывать важность отдельных критериев так, чтобы их суммарный весовой коэффициент стремился к единице, тогда как суммарный коэффициент остальных критериев стремился к нулю — ввиду их ничтожно малой важности по сравнению с первыми.

Однако восьмой подход, представленный в [11], несмотря на все указанные выше достоинства, обладает существенным недостатком. В работе [12] для оценки адекватности каждого подхода вводится «показатель превосходства весового коэффициента наиболее важного критерия по сравнению с весовым коэффициентом наименее важного критерия, т. е. коэффициент наибольшего предпочтения показателей важности критериев, определяемый из выражения»:

$$\gamma = \frac{k_1}{k_n} = \frac{\alpha_1}{\alpha_n}, \tag{1}$$

где $\alpha_1 \dots \alpha_n$ — значения весовых коэффициентов.

Если критерий, обладающий наибольшим весовым коэффициентом, будет иметь весовой коэффициент значимости, существенно превосходящий коэффициент значимости наименее важного критерия, то это ставит под вопрос возможность практического применения данного подхода. Если весовой коэффициент значимости наиболее важного критерия будет превосходить весовой коэффициент значимости наименее важного критерия, например, в 100 раз, то независимо от рассматриваемой ситуации критерий с наименьшей степенью важности не будет оказывать практически никакого влияния на итоговый комплексный показатель приоритета. В этом случае этот критерий можно вообще исключить из расчета из-за его пренебрежимо малого значения. Однако в реальности, даже если какой-то критерий обладает малой важностью по сравнению с другими, разница между весовыми коэффициентами таких критериев не должна отличаться на несколько порядков.

При этом в работе [12] автор сам указывает на сомнительную возможность практического применения: «Имеет место тенденция очень резкого увеличения γ с ростом числа критериев, когда $\gamma > n^2$, что снижает возможность практического использования этого подхода для расчета весовых коэффициентов критериев

линейного порядка ранжирования». Следовательно, чем больше используется критериев, тем менее реализуем этот подход на практике. Так, например, при количестве критериев $n = 3$ показатель γ равен 16,255, то есть разница между значением весового коэффициента наиболее важного и наименее важного критерия составляет больше, чем в 16 раз. Если же количество критериев увеличится до $n = 4$, то показатель γ резко возрастет, и его значение составит уже 253,667, то есть весовой коэффициент значимости наименее важного критерия будет составлять меньше 1 % от значения весового коэффициента наиболее важного критерия, и наименее важный критерий не будет оказывать практически никакого влияния на итоговое значение комплексного показателя приоритета. Ввиду того что количество критериев, которые могут быть использованы для определения очередности перевода подстанций на резистивное заземление нейтрالي, будет больше одного, данный подход не является практически применимым для этой ситуации.

Рассмотрим оставшийся, седьмой подход работы [11], который подразумевает составление матрицы парного сравнения таким образом, чтобы коэффициенты, занесенные в матрицу, удовлетворяли условию:

$$k_{ij} \cdot k_{ji} = 1. \tag{2}$$

Седьмой подход основан на методе анализа иерархий — одном из наиболее распространенных методов парного сравнения критериев, разработанном Т.Л. Саати [13]. Данный подход подразумевает использование специальной вербально-числовой шкалы для оценки важности критериев относительно друг друга. Фундаментальная шкала относительной предпочтительности критериев, применяемая в методе анализа иерархий и предложенная Саати, представлена в таблице 1. Она позволяет экспертам сформировать качествен-

ные суждения о важности каждого критерия относительно остальных, а затем перевести эти суждения в количественные значения с помощью данной шкалы.

Седьмой подход из [11] благодаря использованию фундаментальной вербально-числовой шкалы позволяет учесть недостатки первых шести подходов, рассмотренных ранее. Так, например, если, по мнению какого-либо эксперта, два каких-либо критерия имеют одинаковую степень важности и должны обладать одинаковыми весовыми коэффициентами, то ранжированный список важности критериев может выглядеть следующим образом:

$$K_1 > K_2 > K_3 = K_4 > K_5 > K_6 > \dots > K_n, \tag{3}$$

где K_1 — самый важный критерий, обладающий наибольшим весовым коэффициентом; K_n — наименее важный критерий с наименьшим весовым коэффициентом.

В данном случае критерии K_3 и K_4 равнозначны, поскольку имеют одинаковую степень важности и, соответственно, одинаковый весовой коэффициент значимости.

Помимо этого, седьмой подход позволяет учитывать важность тех или иных критериев в большую или меньшую сторону так, чтобы суммарный весовой коэффициент значимости выбранных более важных критериев стремился к единице.

Рассмотрим случай с 6 единичными детализированными критериями. Пусть первый критерий является наиболее важным по сравнению со всеми остальными. В этом случае все 6 критериев будут сравниваться с первым, так как он обладает наибольшей степенью важности. При сравнении первого критерия с самим собой очевидно, что в соответствии с таблицей 1 он имеет уровень предпочтительности «Равная предпочтительность». Пусть второй критерий является менее важным по сравнению с первым, но также обладает высокой важностью, тогда в соответствии с таблицей 1 ему можно присвоить «Слабую степень предпочтительности». В этом случае второй критерий будет обладать весовым коэффициентом, величина которого немного меньше весового коэффициента первого критерия. Рассмотрим оставшиеся 4 критерия — с третьего по шестой. Предположим, что они обладают существенно меньшей значимостью по сравнению с первым критерием и при этом имеют одинаковую степень важности относительно друг друга. В этом случае в соответствии с таблицей 1 этим четырем критериям можно присвоить, например, «Очень сильную предпочтительность». В этом случае все 4 критерия будут иметь одинаковый весовой коэффициент значимости, при этом этот весовой коэффициент будет много меньше, чем весовые коэффициенты первого и второго критериев.

Кроме того, седьмой подход является практически применимым. Как указывает сам автор [13], при количестве критериев $n = 9$ показатель $\gamma = 17,09$. А при количестве критериев $n = 4$ показатель γ равен всего 4,86. В восьмом подходе, рассмотренном выше, при количестве критериев $n = 4$ показатель $\gamma = 253,667$. Разница между весовым коэффициентом наиболее важного критерия и весовым

коэффициентом наименее важного критерия в седьмом подходе значительно меньше, чем в восьмом подходе, поэтому седьмой подход уже может использоваться в реальных задачах — в отличие от рассмотренного выше восьмого подхода. Пример матрицы парного сравнения для четырех критериев показан в таблице 2.

Таблица 2. Матрица парного сравнения для четырех критериев с рассчитанными весовыми коэффициентами

	K1	K2	K3	K4	C_i	Весовой коэффициент значимости
K1	1	2	3	4	2,21	0,4668
K2	1/2	1	2	3	1,31	0,2776
K3	1/3	1/2	1	2	0,76	0,1603
K4	1/4	1/3	1/2	1	0,45	0,0953

Зная значения уровня предпочтительности критериев из таблицы 2, можно определить собственные векторы критериев C_i :

$$C_i = (k_{i1} \cdot k_{i2} \cdot \dots \cdot k_{in})^{1/n}. \tag{4}$$

А определив их, можно найти весовые коэффициенты значимости по следующей формуле:

$$\alpha_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}. \tag{5}$$

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРИОРИТЕТА

Определив важность каждого единичного детализированного критерия и определив их весовые коэффициенты значимости, можно определить комплексный показатель приоритета, который будет учитывать значимость всех критериев в соответствии с их степенью важности, а именно в соответствии с величиной весового коэффициента каждого единичного критерия. При этом используются значения конкретных показателей приоритета, а так как значение какого-либо показателя приоритета может равняться нулю, то произведения весовых коэффициентов и показателей приоритета должны суммироваться между собой, а не перемножаться. Итоговая формула для определения комплексного показателя приоритета перевода подстанций распределительных сетей 6–10 кВ на резистивное заземление нейтрالي выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \Pi_{\Sigma j} = & (a_1 \cdot \Pi_1) + (a_2 \cdot \Pi_2) + (a_3 \cdot \Pi_3) + (a_4 \cdot \Pi_4) + (a_5 \cdot \Pi_5) + \\ & + (a_6 \cdot \Pi_6) + (a_7 \cdot \Pi_7) + \dots + (a_i \cdot \Pi_i), \end{aligned} \tag{6}$$

где $\Pi_{\Sigma j}$ — комплексный показатель приоритета; $\Pi_1 - \Pi_i$ — соответственно показатели приоритета по каждому критерию; $a_1 - a_i$ — весовые коэффициенты значимости для каждого критерия;

i — количество критериев, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$;
 j — количество подстанций, $j = 1, 2, 3, \dots, J$.

В зависимости от определенной степени важности каждого единичного критерия комплексный показатель может изменяться в ту или иную сторону. Поэтому для правильного определения комплексного показателя приоритета той или иной подстанции сначала должна быть правильно, с учетом всех особенностей, определена важность единичных детализированных критериев относительно друг друга. При этом определение значимости критериев может происходить путем опроса некоторого количества экспертов.

Различные эксперты, возможно, будут давать различные ответы, поэтому итоговая значимость будет определяться на основе статистики и будет более корректной.

Так, например, один эксперт может назвать наиболее важным критерием экономическую целесообразность, а другой — критерий надежности. Поэтому опрос некоторого количества экспертов позволит дать более объективную «картину» и получить более корректные результаты.

Показатели приоритета по каждому единичному детализированному критерию, используемые в комплексном показателе приоритета, будут определяться в зависимости от нормативных документов, действующих в электросетевой компании. При определении очередности перевода ПС на режим низкоомного резистивного заземления нейтрالي предлагается использовать 7 единичных детализированных критериев, вычисляемых по следующим математическим выражениям.

1. Критерий надежности:

$$\Pi_{1i} = \frac{\omega_i}{\omega_{i,max}}, \tag{7}$$

где ω_i — среднее арифметическое количество аварийных отключений за последние три года;
 $\omega_{i,max}$ — максимальное среднее арифметическое количество аварийных отключений за последние три года среди всех рассматриваемых подстанций.

2. Критерий возможности реализации резистивного заземления:

$$\Pi_{2i} = \frac{N_{6/p}}{N_{всего}}, \tag{8}$$

где $N_{6/p}$ — количество фидеров без резервирования;
 $N_{всего}$ — суммарное количество фидеров.

3. Критерий возможности обеспечения эффективной компенсации:

$$\Pi_{3i} = \frac{I_{i,факт}}{I_{i,макс}}, \tag{9}$$

где $I_{i,факт}$ — максимальный емкостный ток среди всех секций шин рассматриваемых подстанций;
 $I_{i,макс}$ — максимальный ток установленного дугогасящего реактора.

Таблица 1. Фундаментальная вербально-числовая шкала относительной предпочтительности критериев, используемая в методе анализа иерархий и предложенная Саати

№	Качественное определение уровня предпочтительности критериев	Количественное значение уровня предпочтительности критериев (k_{ij})
1	2	3
1	Равная предпочтительность	1
2	Слабая степень предпочтительности	2
3	Средняя степень предпочтительности	3
4	Предпочтительность выше среднего	4
5	Умеренно сильная предпочтительность	5
6	Сильная предпочтительность	6
7	Очень сильная предпочтительность	7
8	Очень-очень сильная предпочтительность	8
9	Абсолютная предпочтительность	9

4. Критерий технико-экономического обоснования:

$$П_{4i} = 1 - \frac{З_i - З_{\text{эк. эффект } i}}{З_{\text{макс}} - З_{\text{эк. эффект } imax}},$$
 (10)

где $З_i$ – капитальные затраты на i -ой ПС для реализации резистивного заземления нейтрали;
 $З_{\text{макс}}$ – затраты на ПС, для которой требуются максимальные финансовые вложения;
 $З_{\text{эк. эффект } imax}$ – экономический эффект для подстанции с наибольшими экономическими затратами на оборудование.

5. Критерий развития сети:

$$П_{5i} = 1 - \frac{T_i - 2025}{T_{\text{макс}} - 2025},$$
 (11)

где T_i – срок начала реализации развития (строительства нового объекта на существующей подстанции) i -ой ПС;
 $T_{\text{макс}}$ – срок начала реализации развития (строительства нового объекта на существующей подстанции) наиболее поздней ПС.

6. Критерий реконструкции сети:

$$П_{6i} = 1 - \frac{T_i - 2025}{T_{\text{макс}} - 2025},$$
 (12)

где T_i – срок начала реализации реконструкции i -ой ПС;
 $T_{\text{макс}}$ – срок начала реализации реконструкции наиболее поздней ПС.

7. Критерий наличия на ПС кабелей с СПЭ-изоляцией:

$$П_{7i} = \frac{L_i}{L_{\text{макс}}},$$
 (13)

где L_i – протяженность СПЭ кабелей i -ой ПС;
 $L_{\text{макс}}$ – протяженность СПЭ кабелей у i -й ПС, которая имеет максимальную протяженность СПЭ кабелей среди всех ПС.

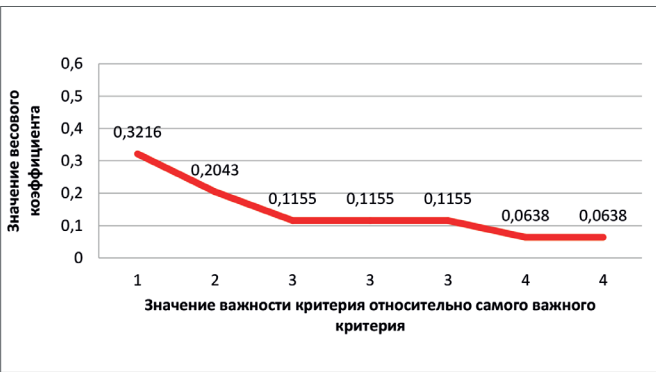


Рис. 1. Зависимость весового коэффициента значимости от важности критерия приоритизации

В соответствии с методом парного сравнения, приведенным ранее, были рассчитаны весовые коэффициенты значимости для семи единичных детализированных критериев. Результаты расчета весовых коэффициентов значимости приведены в таблице 3.

Зависимость весового коэффициента значимости от важности единичного детализированного критерия (показателя) приоритизации перевода электрической сети 6–10 кВ на режим резистивного заземления нейтрали показана на рисунке 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный комплексный показатель приоритета является основой для определения порядка (очередности) перевода распределительных устройств подстанций напряжением 6–10 кВ на режим резистивного заземления нейтрали.

Таблица 3. Значения весовых коэффициентов значимости

№ п.п.	Обозначение весового коэффициента значимости		Наименование единичного детализированного критерия (показателя) приоритета	Весовые коэффициенты значимости
	Методика парного сравнения	Комплексный показатель приоритета		
1.	K1	a_1	Надежности	0,3216
2.	K4	a_4	Технико-экономического обоснования	0,2043
3.	K2	a_2	Возможности реализации резистивного заземления	0,1155
4.	K3	a_3	Возможности обеспечения эффективной компенсации	0,1155
5.	K7	a_7	Доля кабелей с СПЭ-изоляцией на каждой ПС	0,1155
6.	K6	a_6	Реконструкции сети	0,0638
7.	K5	a_5	Развития сети	0,0638

Он позволяет учесть несколько единичных детализированных критериев с учетом весовых коэффициентов значимости каждого из них по отношению друг к другу. Рассмотрены детализированные критерии приоритизации перевода электрических сетей 6–10 кВ на режим низкоомного резистивного заземления нейтрали. Указаны основные допущения, принятые при расчете единичных детализированных критериев.

В зависимости от особенностей конкретной электросетевой компании весовые коэффициенты значимости каждого единичного критерия могут быть скорректированы в большую или меньшую сторону в зависимости от реальной ситуации и важности основных критериев при принятии решения о приоритизации. Для одних компаний определенные критерии являются ключевыми при определении порядка приоритета подстанций для изменения режима нейтрали. Для других компаний эти критерии могут не являться ключевыми ввиду тех или иных причин, поэтому предложенный комплексный показатель приоритета позволяет гибко подстраиваться под конкретные условия.

Для одной из электросетевых компаний мегаполиса получены весовые коэффициенты значимости для семи единичных показателей (критериев) перевода распределительных электрических сетей 6–10 кВ на режим низкоомного резистивного заземления нейтрали.

Предложенный комплексный показатель приоритета может быть использован не только для определения очередности перевода подстанций на режим резистивного заземления нейтрали, но также и для ранжирования подстанций при решении других задач, например реконструкции подстанций, строительстве новых подстанций и т. д.

В зависимости от решаемой задачи набор единичных критериев может быть заменен на актуальный состав критериев с корректировкой их весовых коэффициентов.

Рисунок к статье предоставлен авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабырь К.В. Организация селективной защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей горных предприятий / К.В. Бабырь, Д.Н. Пеленев // Новые идеи в науках о Земле : Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах, Москва, 02–05 апреля 2019 года. Том 4. Москва : Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2019. С. 31–33. EDN ARPWZE.

2. Niu L. Single-Phase Fault Line Selection in Distribution Network Based on Signal Injection Method / L. Niu, G. Wu, Z. Xu // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 21567–21578. DOI 10.1109/

ACCESS.2021.3055236.

3. Chowdhury R. Restricted Earth Fault Protection in Low-Impedance Grounded Systems With Inverter-Based Resources / R. Chowdhury, M. Alla, N. Fischer, S. Samineni // IEEE Transactions on Power Delivery. 2023. Vol. 38, No. 1. P. 505–512. DOI 10.1109/TPWRD.2022.3195741.

4. Aikaterini B., Nikolaos U. Development of a portable device for preventing injuries due to a loss of grounding and broken neutral // IEEE Potentials. 2022. Vol. 41, No. 5. P. 44–51. DOI 10.1109/MPOT.2014.2363404.

5. О формировании технических требований к конструкции, надежности и оценке технического состояния дугогасящих реакторов 6–35 кВ / А.Н. Назарычев, С.С. Титенков, А.А. Пугачев [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 3(72). С. 136–142. EDN RKREWP.

6. Naghizadeh M. A Common-Grounded Single-Phase AC/Bipolar DC Hybrid Microgrid With a Four-Leg Interlinking Converter / M. Naghizadeh, H. Hojabri, E. Muljadi // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2023. Vol. 11, No. 5. P. 5337–5353. DOI 10.1109/JESTPE.2023.3312210.

7. Borghetti A. Assessment of the Effects of the Electromagnetic Pulse on the Response of Overhead Distribution Lines to Direct Lightning Strikes / A. Borghetti, K. Ishimoto, F. Napolitano, C. A. Nucci, F. Tossani // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2021. Vol. 8. P. 522–531. DOI 10.1109/OAJPE.2021.3099596.

8. Abramovich B. N. Efficiency estimation of hybrid electrical complex for voltage and current waveform correction in power systems of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of

Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019), Saint Petersburg – Moscow, 28–30 January 2019. Saint Petersburg – Moscow : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 401–406. DOI 10.1109/EIConRus.2019.8657081. EDN RGOCUW.

9. Seyed-Bouzari S.A. Controllability-Oriented Design Method of DFIGs in Wind Turbine Systems / S. A. Seyed-Bouzari, A. Muetze, J. P. Bacher, B. Polajžer // 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Houston, TX, USA, 2025. P. 512–517. DOI 10.1109/IEMDC60492.2025.11061162.

10. Ustinov D.A. Determination of Dynamic Characteristics for Predicting Electrical Load Curves of Mining Enterprises / D.A. Ustinov, K.A. Khomiakov // Electricity. 2022. Vol. 3, No. 2. P. 162–181. DOI 10.3390/electricity3020010. EDN TKUQWL.

11. Спиридонов С.Б. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев / С.Б. Спиридонов, И.Г. Булатова, В.М. Постников // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9, № 6. С. 13. EDN YSAHCJ.

12. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. Москва : Университетская лавка, Логос, 2008. 392 с.

13. Саати Т.Л. Метод анализа иерархий. Москва : Мир, 1993. 120 с.