

УДК 621.316

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПЕРЕВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 КВ С РЕЖИМА ИЗОЛИРОВАННОЙ ИЛИ КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛИ НА РЕЖИМ ЕЁ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР

М. А. КОРОТКЕВИЧ

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск*

В. М. ЖЕЛЕЗКО

*Филиал РУП «Гомельэнерго» Речицкие электрические
сети, Республика Беларусь*

Введение

В настоящее время в Республике Беларусь, как и в странах СНГ, согласно [1], распределительные электрические сети напряжением 6–10 кВ работают в режиме с изолированной или с компенсированной через дугогасящий реактор нейтралью. Применение таких режимов нейтрали связано с возможностью обеспечения электроснабжения потребителей при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), особенно в условиях отсутствия автоматического резервирования электроснабжения.

Наряду с обеспечением потребителей бесперебойным электроснабжением, сети с изолированной и компенсированной нейтралью имеют следующие недостатки:

- необходимость выполнения фазной изоляции на линейное напряжение;
- невозможность селективного обнаружения поврежденной линии из-за малых токов замыкания на землю;
- уменьшение срока службы изоляции из-за возникающих перенапряжений при дуговых замыканиях на землю;
- возможностью появления феррорезонансных перенапряжений;
- повышенная опасность для жизни людей и животных из-за возможности поражения электрическим током при шаговых напряжениях и напряжениях прикосновения.

Исключить недостатки, свойственные сетям с изолированной и компенсированной нейтралью, можно путем перевода таких сетей в режим заземления нейтрали через резистор (низкоомный или высокоомный). Так как заземление нейтрали через низкоомный резистор (сопротивлением до 10 Ом) требует значительных капитальных затрат на модернизацию заземляющих устройств трансформаторных подстанций с целью доведения их сопротивления до 0,5 Ом [2], то целесообразным является применение высокоомного резистора, рассчитанного на кратковременную работу в режиме ОЗЗ. При этом протекающий по поврежденной линии активный ток позволяет средствам релейной защиты селективно отключить поврежденную линию и исключить, тем самым, воздействия опасных перенапряжений на изоляцию сети, а также повысить уровень ее электробезопасности.

Электрическим сетям с резистивным заземлением нейтрали свойственны следующие недостатки:

- в результате отключения линии при ОЗЗ и отсутствии автоматического резервирования питания увеличивается недоотпуск электроэнергии потребителям;
- отключение воздушной линии при ОЗЗ приводит к увеличению времени отыскания места повреждения из-за невозможности использования приборов поиска мест повреждений;
- невозможно обеспечить условие эффективного заземления нейтрали, что приводит к необходимости выполнять фазную изоляцию на линейное напряжение [3];
- значительное тепловыделение резисторов сопротивлением порядка 100–200 Ом вводит ограничение по максимальной продолжительности работы в режиме ОЗЗ, которая не должна превышать 2 с;
- наличие напряжения смещения нейтрали из-за неодинаковых емкостей фаз приводит к постоянному протеканию тока через резистор и его нагреву, что увеличивает потери мощности на подстанции.

Постановка задачи

При принятии решения о переводе электрических сетей напряжением 6–10 кВ в режим с резистивным заземлением нейтрали, в технико-экономическом обосновании необходимо учитывать фактор увеличения недоотпуска электроэнергии потребителям при отключении ОЗЗ в неавтоматизированных сетях, что не принимается во внимание для автоматизированных сетей [4].

В [3] оценка изменения режима нейтрали проведена с использованием метода многоцелевой оптимизации без учета увеличения недоотпуска электроэнергии при отключении ОЗЗ.

Выполним оценку перевода распределительной электрической сети напряжением 10 кВ одной подстанции на режим её заземления через резистор с использованием метода многоцелевой оптимизации.

Рассматриваемая сеть является смешанной и имеет суммарную длину кабельных и воздушных линий 66,5 и 11 км, соответственно. Защита отходящих линий выполнена с применением микропроцессорных блоков типа БМРЗ-КЛ-42 производства НТЦ «Механотроника», г. Санкт-Петербург. За рассматриваемый период наблюдалось 57 отказов, в том числе 23 однофазных замыкания, из которых 17 отключались релейной защитой, а при остальных 6-ти – защита действовала на сигнал. Отключение части линий при ОЗЗ привело к увеличению недоотпуска электроэнергии на 30 % по сравнению с недоотпуском, вызванным отключением линий при междуфазных коротких замыканиях. Если бы средствами релейной защиты отключались все линии при ОЗЗ, то увеличение недоотпуска электроэнергии потребителям было бы более 30 %.

Задачу сформулируем следующим образом: при минимуме капитальных затрат K , максимуме срока службы изоляции t , максимуме электробезопасности сети B и минимуме недоотпуска электроэнергии потребителям W , необходимо выбрать целесообразный режим нейтрали.

Структуру целевой функции E представим в виде [3]:

$$E = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_i} \right)^{-1} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где E – критерий оптимизации; n – количество целей, $n = 4$; v_i – оценка важности i -й цели, при этом $\sum_{i=1}^n v_i = 1$ [3]; e_i – относительная эффективность i -й цели.

Относительная эффективность e_i i -й цели определяется как:

– для минимизируемой цели

$$e_i = \frac{\min X_i}{X_i}; \quad (2)$$

– для максимизируемой цели

$$e_i = \frac{X_i}{\max X_i}, \quad (3)$$

где X_i – текущее значение показателя i -й цели; $\min X_i$, $\max X_i$ – минимальное и максимальное значения показателя i -й цели.

Наиболее эффективным считается вариант, для которого не только соблюдается условие (1), но и у которого [3]

$$\frac{|E_{\text{ЗАЗ}} - E_{\text{ИЗ}}| \cdot 100\%}{E_{\text{ЗАЗ}}} \geq 20\%, \quad (4)$$

где $E_{\text{ЗАЗ}}$, $E_{\text{ИЗ}}$ – сравниваемые варианты.

Пусть показатели целей в относительных единицах для сети с изолированной (компенсированной) нейтралью будут равны единице $K_{*1} = t_{*1} = B_{*1} = W_{*1} = 1$. Тогда для сети с резистором в нейтрали:

- $K_{*2} = 1,8$ (определена на основании сметы затрат); для расчетов примем $K_{*2} = (1,5 \div 5)$;
- $t_{*2} = 2$ – для кабельных сетей и 1,3 – для воздушных сетей [3];
- B_{*2} – для сети с резистором в нейтрали возрастает на несколько порядков, но для практических расчетов примем $B_{*2} = (1,25 \div 5)$ [3];
- $W_{*2} = 1,3$ (на основании статистической информации), для расчетов примем $W_{*2} = (1,3 \div 2)$.

Оценку важностей целей v_i проведем экспертным путем [3]. В качестве экспертов привлекалось 10 специалистов из персонала предприятия электрических сетей, которые независимо друг от друга присвоили ранг каждому из критериальных свойств (табл. 1).

Таблица 1

Значения рангов критериальных свойств

Номер эксперта	Ранг цели			
	$\min K$	$\max t$	$\max B$	$\min W$
1	4	2	1	3
2	3	1	2	4

Окончание табл. 1

Номер эксперта	Ранг цели			
	min K	max t	max B	min W
3	3	2	1	4
4	2	3	1	4
5	4	3	1	2
6	4	1	2	3
7	3	1	2	4
8	4	2	1	3
9	3	1	2	4
10	3	2	1	4
Сумма рангов каждой цели A_i	33	18	14	35
R_i	0,425	0,8	0,9	0,375

Значения весовых коэффициентов находились как [3]:

$$v_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (5)$$

где R_i – значения рангов критериальных свойств для i -й цели, находятся как [3]:

$$R_i = 1 + \frac{1}{n} - \frac{A_i}{n \cdot N}, \quad (6)$$

где n – число целей, $n = 4$; N – число экспертов, $N = 10$; A_i – сумма рангов каждой i -й цели.

Численные значения значимости целей v_i по формуле (5) составили: $v_K = 0,17$; $v_t = 0,32$; $v_B = 0,36$; $v_W = 0,15$.

Полученные результаты

Результаты расчетов значений критерия оптимизации для сетей с кабельными и воздушными линиями приведены в табл. 2 и 3, соответственно, из которых видно, что при $B_{*2} = 1,25$ условие (4) выполняется лишь для кабельных сетей при $K_{*2} = 1,5$ и $W_{*2} = 1,3$. В данном случае разность между критериями оптимизации близка к 20 %. Если принять $B_{*2} = 5$, то увеличение капитальных затрат на изменение режима нейтрали сети возможно до пятикратного значения даже при увеличении недоотпуска электроэнергии в 2 раза.

При равнозначных оценках целей, т. е. $v_K = v_t = v_B = v_W = 0,25$ условие (4) при $B_{*2} = 1,25$ не выполняется ни при каких значениях K_{*2} . Если принять $B_{*2} = 5$, то при двукратном увеличении недоотпуска электроэнергии потребителям, увеличение капитальных затрат на изменение режима нейтрали возможно не более чем в 3 раза как для кабельных, так и для воздушных сетей (табл. 2, 3).

Таблица 2

Значения критерия оптимизации E для сети с кабельными линиями

Значения показателей целей				Критерий оптимизации E при нейтралі:		$E_{ЗАЗ} / E_{ИЗ}$	$\frac{ E_{ЗАЗ} - E_{ИЗ} \cdot 100\%}{E_{ЗАЗ}}$
K_{*2}	t_{*2}	B_{*2}	W_{*2}	изолированной $E_{ИЗ}$	заземленной $E_{ЗАЗ}$		
1,5	2	1,25	1,3	0,71 / 0,76	0,88 / 0,83	1,25 / 1,09	19,86 / 8,57
2	2	1,25	1,3	0,71 / 0,76	0,82 / 0,75	1,16 / 0,99	13,83 / 0,95
3	2	1,25	1,3	0,71 / 0,76	0,72 / 0,63	1,02 / 0,83	1,77 / 20,00
5	2	1,25	1,3	0,71 / 0,76	0,58 / 0,48	0,82 / 0,63	22,34 / 58,10
1,5	2	5	1,3	0,36 / 0,44	0,88 / 0,83	2,44 / 1,88	59,06 / 46,67
2	2	5	1,3	0,36 / 0,44	0,82 / 0,75	2,27 / 1,70	55,98 / 41,11
3	2	5	1,3	0,36 / 0,44	0,72 / 0,63	1,99 / 1,43	49,82 / 30,00
5	2	5	1,3	0,36 / 0,44	0,58 / 0,48	1,60 / 1,08	37,50 / 7,78
1,5	2	5	1,5	0,36 / 0,44	0,86 / 0,80	2,38 / 1,80	57,97 / 44,44
2	2	5	1,5	0,36 / 0,44	0,80 / 0,73	2,22 / 1,64	54,89 / 38,89
3	2	5	1,5	0,36 / 0,44	0,71 / 0,62	1,95 / 1,38	48,73 / 27,78
5	2	5	1,5	0,36 / 0,44	0,57 / 0,47	1,57 / 1,06	36,41 / 5,56
1,5	2	5	2	0,36 / 0,44	0,81 / 0,73	2,23 / 1,64	55,25 / 38,89
2	2	5	2	0,36 / 0,44	0,76 / 0,67	2,09 / 1,50	52,17 / 33,33
3	2	5	2	0,36 / 0,44	0,67 / 0,57	1,85 / 1,29	46,01 / 22,22
5	2	5	2	0,36 / 0,44	0,55 / 0,44	1,51 / 1,00	33,70 / 0,00

Таблица 3

Значения критерия оптимизации E для сети с воздушными линиями

Значения показателей целей				Критерий оптимизации E при нейтралі:		$E_{ЗАЗ} / E_{ИЗ}$	$\frac{ E_{ЗАЗ} - E_{ИЗ} \cdot 100\%}{E_{ЗАЗ}}$
K_{*2}	t_{*2}	B_{*2}	W_{*2}	изолированной $E_{ИЗ}$	заземленной $E_{ЗАЗ}$		
1,5	1,3	1,25	1,3	0,84 / 0,88	0,88 / 0,83	1,05 / 0,95	4,72 / 5,49
2	1,3	1,25	1,3	0,84 / 0,88	0,82 / 0,75	0,98 / 0,86	2,45 / 16,48
3	1,3	1,25	1,3	0,84 / 0,88	0,72 / 0,63	0,86 / 0,72	16,78 / 38,46
5	1,3	1,25	1,3	0,84 / 0,88	0,58 / 0,48	0,69 / 0,55	45,45 / 82,42
1,5	1,3	5	1,3	0,39 / 0,48	0,88 / 0,83	2,24 / 1,73	55,44 / 42,17
2	1,3	5	1,3	0,39 / 0,48	0,82 / 0,75	2,09 / 1,57	52,09 / 36,14
3	1,3	5	1,3	0,39 / 0,48	0,72 / 0,63	1,83 / 1,32	45,39 / 24,10
5	1,3	5	1,3	0,39 / 0,48	0,58 / 0,48	1,47 / 1,00	31,98 / 0,00
1,5	1,3	5	1,5	0,39 / 0,48	0,86 / 0,80	2,19 / 1,66	54,26 / 39,76
2	1,3	5	1,5	0,39 / 0,48	0,80 / 0,73	2,04 / 1,51	50,91 / 33,73
3	1,3	5	1,5	0,39 / 0,48	0,71 / 0,62	1,79 / 1,28	44,20 / 21,69
5	1,3	5	1,5	0,39 / 0,48	0,57 / 0,47	1,45 / 0,98	30,80 / 2,41
1,5	1,3	5	2	0,39 / 0,48	0,81 / 0,73	2,05 / 1,51	51,30 / 33,73
2	1,3	5	2	0,39 / 0,48	0,76 / 0,67	1,92 / 1,38	47,95 / 27,71
3	1,3	5	2	0,39 / 0,48	0,67 / 0,57	1,70 / 1,19	41,25 / 15,66
5	1,3	5	2	0,39 / 0,48	0,55 / 0,44	1,39 / 0,92	27,84 / 8,43

Примечание. В числителе – при экспертной оценке важности целей, в знаменателе – при равнозначных целях.

Как видно из полученных результатов, применение резистивного заземления нейтрали и, следовательно, немедленное отключение ОЗЗ оправдано для сетей, уровень резервирования и автоматизации которых допускает увеличение недоотпуска электроэнергии потребителям не более чем в 2 раза по сравнению с недоотпуском, вызванным отключением линий при междуфазных коротких замыканиях.

Выводы

При отсутствии автоматического резервирования питания немедленное отключение ОЗЗ приводит к увеличению недоотпуска электроэнергии потребителям, но вместе с тем уменьшает продолжительность воздействия опасных перенапряжений на изоляцию сети и улучшает условия электробезопасности для людей и животных.

На основе метода многоцелевой оптимизации установлено, что капитальные затраты на перевод неавтоматизированной сети в режим заземленной через высокоомный резистор нейтрали не являются определяющими. При равнозначных оценках важности целей, повышение капитальных затрат на изменение режима нейтрали не должно превосходить трехкратного значения, что, тем не менее, является достаточным для приобретения и монтажа заземляющего резистора и микропроцессорных блоков релейной защиты на всех отходящих линиях.

В настоящее время имеются все необходимые предпосылки для перевода распределительных электрических сетей напряжением 6–10 кВ в режим работы с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, рассчитанный на кратковременную работу в режиме ОЗЗ, при условии увеличения недоотпуска электроэнергии потребителям не более чем в 2 раза по сравнению с недоотпуском, вызванным отключением линий при междуфазных коротких замыканиях.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – Минск : УП «ДИЭКОС», 2003. – 632 с.
2. Короткевич, М. А. Режимы нейтрали городской электрической сети / М. А. Короткевич, Жив Д. Л. – Минск : БелНИИагроэнерго, 1997. – 68 с.
3. Короткевич, М. А. Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей / М. А. Короткевич. – Минск : ЗАО «Техноперспектива», 2003. – 373 с.
4. Временные методические указания по переводу сетей 6–35 кВ Белорусской энергосистемы с режима изолированной нейтрали на режим заземления нейтрали через резистор. – Минск : Концерн «Белэнерго», 2004. – 30 с.

Получено 15.06.2006 г.