

Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ: теоретические аспекты

(по статье Матвеева Д.А. и Хренова С.И., «Электричество», 2015, № 1)

КАЧЕСОВ В.Е.

Авторы статьи поднимают актуальный вопрос оптимального способа заземления нейтрали распределительных сетей и эффективности применения в них управляемых дугогасящих катушек (ДГК). Несомненно, с ними можно согласиться, что повышение надежности работы изоляции за счет ограничения дуговых перенапряжений, охватывающих всю сеть и приводящих к деградации изоляции, не представляется возможным, поскольку максимальная кратность перенапряжений в сетях со слабым демпфированием свободных колебаний составляет $\sim 3,1U_{фм}$ (в основном, это воздушные сети) [1] и $\sim 2,4U_{фм}$ – в сетях с заметным затуханием свободных колебаний (кабельные сети) [2]. Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), производимые по современным технологическим процессам и применяемые в распределительных сетях с неэффективно заземленной нейтралью, позволяют ограничить дуговые перенапряжения не ниже $\sim 3,1U_{фм}$, т.е. как средство защиты от этого вида перенапряжений не эффективны. Поэтому повышение надежности работы изоляции может быть направлено на применение управляемых ДГК, обеспечивающих снижение перенапряжений до уровня $2,2-2,4U_{фм}$, а также на выделение поврежденного фидера, выступающего в качестве источника электромагнитных возмущений во всей сети, и вывод его из работы (по возможности). Способы достоверного выделения поврежденных фидеров в сильно разветвленных распределенных сетях достаточно хорошо апробированы, более того, существуют системы on-line-диагностики состояния изоляции (а также локация однофазного замыкания), которые могли бы служить для оптимального оперативного управления сетью в предаварийных/аварийных режимах, а также для целенаправленной и своевременной профилактики изоляции. Однако запрос на внедрение таких систем со стороны эксплуатирующих организаций крайне слаб.

Введение в нейтрали сетей дугогасящих катушек (в том числе автоматически управляемых), эффективность применения которых доказана почти

вековым опытом эксплуатации, несомненно снижает разрушающее воздействие заземляющей дуги, повышает вероятность самовосстановления изоляции и электробезопасность сети, которую неоправданно относят на второй план. Даже в кабельных сетях с удовлетворительной компенсацией емкостных токов замыкания на уровне 90% процент самоустраниющихся замыканий, как показали результаты мониторинга в городских сетях, может достигать 70%, т.е. эффективность применения даже неуправляемых ДГК очевидна.

Давая оценку «быстродействию» управляемых ДГК, авторы указывают на возможность появления апериодической составляющей тока, препятствующей гашению дуги. И согласно представленным расчетам длительность негашения дуги при углах (фазах) пробоя фазной изоляции j , далеких от 90° , может достигать нескольких периодов промышленной частоты, что, казалось бы, свидетельствует о неэффективности реакторов для снижения емкостного тока замыкания на землю (ЕТЗЗ) в первые моменты времени после возникновения замыкания. Однако простые аналитические расчеты показывают, что индуктивный ток ДГК и его апериодическая компонента много меньше свободных токов, обеспечивающих уверенное прохождение полного тока дуги через нуль и, соответственно, самопогасание дуги.

Условие возможного гашения заземляющей дуги – достижение полным током замыкания $i_3(t)$ нулевого значения. Его можно записать как

$$i_3(t) = i_C(t) + i_{ДГК}(t) + i_{ап}(t) + i_{разр}(t) + i_{пер}(t) = 0, \quad (1)$$

где в правую часть уравнения входят следующие составляющие полного тока замыкания: ЕТЗЗ, ток ДГК, апериодический ток замыкания, обусловленный ДГК, разрядный и перезарядный свободные токи.

При коэффициенте компенсации ЕТЗЗ $K_L = (3\omega^2 L_{ДГК} C_\phi)^{-1} \gg 1$ сумма вынужденных токов $i_C(t) + i_{ДГК}(t) \gg 0$, и условие (1) для случая пер-

вичного пробоя изоляции можно переписать следующим образом:

$$\frac{U_{\phi m}}{wL_{\text{ДГК}}} e^{-d_0 t} \cos j + I_{\text{пер}} \sin(b_1 t) e^{-d_1 t} + I_{\text{анм}} + I_{\text{разр}} \sin(b_2 t) e^{-d_2 t} = 0, \quad (2)$$

где d_0 – коэффициент затухания аperiodического тока; b_1, d_1, b_2, d_2 – круговая частота и коэффициент затухания перезарядных и разрядных свободных токов.

Амплитуда свободной *перезарядной* составляющей тока при замыкании вблизи центра питания приближенно определяется как

$$I_{\text{пер}} \approx \frac{U_{\phi m} \sin(\omega t + j)}{Z_C},$$

где $Z_C \approx \sqrt{\frac{3(L_S + L_L)}{4(C_{\phi} + C_{\phi\phi})}}$ – характеристическое сопротивление перезарядного контура; L_S и L_L – индуктивность источника и эквивалентная индуктивность линий.

Разрядная токовая компонента, так же как в общем случае и перезарядная, в значительной мере зависит от места возникновения замыкания. При замыкании в средней части линии ее максимальное значение ($j \approx 90^\circ$) оценивается как

$$I_{\text{разр}} \approx \frac{2U_{\phi m}}{Z_{C_3}},$$

где $Z_{C_3} = \frac{Z_{C\phi}^2 + Z_{C\phi} Z_{C\phi\phi} - 2Z_{C\phi\phi}^2}{Z_{C\phi}}$, $Z_{C\phi}$ и $Z_{C\phi\phi}$ –

фазное и междуфазное волновые/характеристические сопротивления линии.

После возникновения замыкания гашение дуги возможно в момент времени, приблизительно равный $t_1 \approx 2\pi / b_1$, когда значителен разрядный ток, а возрастающий перезарядный к этому времени относительно мал ($b_2 > b_1$), но в реальных распределительных сетях в силу типичного сочетания емкостно-индуктивных параметров время первого достижения током замыкания нулевого значения (время потенциального самопогасания дуги) в большинстве случаев составляет $t_2 \approx 2\pi / b_2$, т.е. спустя полупериод перезарядной частоты. За это время затуханием аperiodического тока можно пренебречь, поскольку $e^{-d_0(\pi/b_2)} \gg 1$ (см. (2)).

Значение угла пробоя фазной изоляции j , ниже которого не обеспечивается пересечение током за-

мыкания нулевого значения, определяется из выражения

$$\frac{U_{\phi m}}{wL_{\text{ДГК}}} \cos j = \frac{U_{\phi m} \sin j}{Z_C}.$$

Тогда минимальное пробивное напряжение, ниже которого не происходит обрыв заземляющей дуги,

$$U_{\text{пр min}} = \sin(\arctg(3wC_{\phi} K_L Z_C)) \cdot \text{отн.ед.} \quad (3)$$

Из (3) следует, что невозможность самопогасания заземляющей дуги из-за аperiodической компоненты тока замыкания при $K_L = 1$ определяется только соотношением характеристического перезарядного сопротивления к емкостному сопротивлению нулевой последовательности $1/3wC_{\phi}$ (3). Можно также $U_{\text{пр min}}$ представить как

$$U_{\text{пр min}} = \sin(\arctg(\frac{I_{\text{пер}}}{I_{Cm}})) \cdot I_{Cm} = 3wC_{\phi} U_{\phi m}. \quad (4)$$

В качестве примера для кабельных сетей 10 кВ с токами замыкания, равными $20 A_{\phi}$, превышение которых требует применения компенсации ЕТЗ3 посредством ДГК [3] и мощностей понизительных трансформаторов 110/10 кВ в диапазоне 25–63 МВА, амплитуды перезарядных токов достигают при пробое на амплитудном фазном напряжении 370–570 А, а с учетом сопротивления канала дуги ~300–400 А (в расчетах принято, что $L_S = L_L$). В воздушных сетях из-за заметно большего волнового сопротивления линий и, соответственно, характеристического сопротивления Z_C перезарядные токи снижаются в ~2–3 раза (действительная степень снижения зависит от конкретных параметров сети, включая топологию). Для снижения свободного тока $I_{\text{пер}}$ до амплитуды индуктивного компенсационного тока $I_{\text{ДГКм}} = I_{\text{анм}} = 20\sqrt{2}$ А, когда возможно отсутствие нуля тока в заземляющей дуге, пробивное напряжение в кабельной сети должно снизиться до значения порядка $U_{\text{пр min}} = 20\sqrt{2} / 300 \approx 0,1U_{\phi m}$, а в воздушной сети, соответственно до $\sim 0,33U_{\phi m}$.

Деграция изоляции (снижение ее электрической прочности) под воздействием всех эксплуатационных факторов – медленный процесс, что объясняет большинство первичных пробоев на напряжении, близком к абсолютному максимуму. Изменение пробивного напряжения изоляции за время, меньшее, чем полупериод промышленной частоты, от $U_{\phi m}$ (нормальный эксплуатационный режим) до

$U_{\text{пр min}}$ – крайне маловероятное событие, поэтому задержку погасания заземляющей дуги, обусловленную апериодической компонентой тока замыкания, можно считать практически невозможной.

В воздушных сетях вероятность гашения заземляющей дуги из-за апериодического тока в дуге имеет заметно большее, чем в кабельных сетях, значение из-за возможности грозового поражения ВЛ в момент времени, не отвечающий максимуму фазного напряжения. Возможность появления и длительность существования апериодического тока определяются, помимо указанных факторов, следующим: наличием в токе замыкания значительных ультрагармонических составляющих (I_{Γ}) и нелинейностью вольт-амперной характеристики дуги.

Ультрагармонические составляющие принципиально не компенсируются ДГК и, как показывают прямые измерения, в городских сетях могут достигать десятков процентов. При изменении тока открытой дуги от 100 до 10 А ее сопротивление увеличивается примерно в 15 раз, способствуя быстрому затуханию апериодической составляющей тока. Если обрыв тока дуги не происходит за время существования свободных токов в дуге, то время задержки прерывания оценивается грубо как

$$t_{\text{гаш}} \approx t \ln \frac{I_C}{I_C(1 - K_L) + I_{\Gamma}^*} = t \ln \frac{I_C}{I_C(1 - K_L) + I_{\Gamma}^*} \quad (5)$$

где t – эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока дуги в контуре ее протекания; I_{Γ}^* – относительное (по отношению ЕТЗЗ) содержание токов ультрагармонических составляющих.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 8, pp. 62–64.

REFERENCES

1. Likhachev F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu i s kompensatsiyei emkostnykh tokov* (Earth faults in networks with insulated neutral and compensated capacitive currents). Moscow, Publ. «Energiya», 1971, 152 p.

Мониторинг городских распределительных (преимущественно кабельных) сетей 10 кВ с ЕТЗЗ, равными 30, 70 А, оснащенных традиционными неуправляемыми ДГК с $K_L = 0,4, 0,9$, не выявил случаев задержки прерывания тока дуги, обусловленных его апериодической составляющей. Изложенное позволяет рекомендовать выполнять мониторинг переходных процессов в воздушных распределительных сетях, оснащенных управляемыми ДГК. Практическая реализация систем как мониторинга [2], так и диагностики на современных аппаратно-программных измерительных средствах не вызывает каких-либо технических трудностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971, 152 с.

2. Качесов В.Е., Ларионов В.Н., Овсянников А.Г. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях. – Электрические станции, 2002, №8, с. 38–45

3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: ЭНАС, 2006. 304 с.

[03.03.15]

Автор: Качесов Владимир Егорович в 1981 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (ныне Новосибирский государственный технический университет). В 2008 г. в Томском политехническом университете защитил докторскую диссертацию «Однофазные повреждения в электрических сетях среднего и высокого классов напряжения. Теория, методы исследований и меры предотвращения повреждений». Главный специалист НПП «ЭНЕРГО-КОНСАЛТ» (Новосибирск).

2. Kachesov V.Ye., Larionov V.N. Ovsyannikov A.G. *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2002, No. 8, pp. 38–45.

3. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelei* (Rules of technical operation of electrical consumers). Moscow, Publ. «ENAS», 2006, 304 p.

Author: Kachesov Vladimir Yegorovich (Novosibirsk, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Senior specialist of the Scientific and production enterprise «ENERGOKONSALT».

