

В предыдущем номере журнала («Новости ЭлектроТехники» №1(91) 2015) был поднят вопрос о необходимости систематизировать подходы к выбору загруженности кабельных линий 6-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена [1]. В частности, при выборе достаточного сечения жилы предложено учитывать способность кабеля к перегрузкам.

Анализ ряда проектов в области электроэнергетики показывает, что зачастую допустимость перегрузок не учитывается не только для новых видов оборудования, но даже и для хорошо известных и давно применяемых в сетях. О некоторых перегрузочных особенностях, которые необходимо знать проектировщикам, рассказывает Михаил Викторович Дмитриев.

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ 6–500 кВ Выбор с учетом перегрузок

Одним из важных моментов любого проекта является выбор оборудования и его номинальных параметров по току, по мощности и др. Понимая ответственность принимаемых решений, но при этом не имея достаточных знаний и опыта, молодые проектировщики, которых сейчас в проектных институтах большинство, на всякий случай завышают требования к оборудованию, предпочитая более мощное, которое будет работать с запасом.

Также известны случаи, когда запас заключается не в завышении требований к параметрам, а в самом факте появления в проекте каких-то дополнительных единиц оборудования: увеличивается число ОПН, принимается решение об установке на ВЛ шунтирующих реакторов, хотя зачастую в этом нет необходимости [2].

Идеология запасов в целом оправдана хотя бы потому, что не всегда имеется достоверная информация о схеме развития сети, режимах ее работы, нагрузках. Но не стоит забывать, что оборудование электрической сети допускает перегрузки. Если не учитывать этого, то выпускаемые проектные решения по сути будут иметь двойной запас:

- запас «на всякий случай» при формулировании требований к оборудованию (например, он может быть связан с учетом перспективного роста нагрузок сети по излишне активному сценарию);
- запас непосредственно при выборе самого оборудования, связанный с неучетом допустимых для оборудования перегрузок, разрешенных как рядом нормативных документов, так и заводами-изготовителями.

Двойной запас, возникающий по названным причинам, вряд ли можно считать оправданным, ведь он приводит к значительному удорожанию объектов энергетики, а порой, как ни странно, способен не повысить, а даже снизить надежность сети. В частности, незагруженные трансформаторы вступают в феррорезонанс, реакторы на линиях дают проблемы с аperiodическими токами и резонансными перенапряжениями [2], ОПН из-за неверного выбора вызывают короткие замыкания на землю.

Цель статьи – обратить внимание специалистов на то, что для оборудования сети допустимы перегрузки, подчас весьма существенные.

Сделаем это на примере силовых трансформаторов и кабельных линий.

### СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Рассмотрим схему вида рис.1, где распределительное устройство (РУ) с двумя силовыми трансформаторами (Т) получает питание по двухцепной кабельной линии (КЛ).

В схеме при выборе мощности трансформатора  $S_T$  расчетной полагается ситуация, когда один трансформатор (Т-2) выведен в длительный ремонт, а в работе находится другой. Его мощность может быть найдена из выражения:

$$S_T = S_H / K_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $S_H$  – суммарная мощность нагрузки РУ;  
 $K_{\Pi} \geq 1$  – коэффициент перегрузки.



**Михаил Дмитриев,**  
к.т.н., заместитель генерального  
директора по научной работе  
ПКБ «РосЭнергоМонтаж»,  
г. Санкт-Петербург

В общем случае, каким принять  $K_{\Pi}$ , зависит от многих обстоятельств, среди которых и конструкция самого трансформатора (масляный или сухой), и число параллельно работающих трансформаторов, и неравномерность суточного графика нагрузки. Все эти факторы в конечном счете позволяют понять, допустима ли работа силового трансформатора с нагрузкой сверх его номинальной мощности (работа с перегрузкой), какова величина такой перегрузки, с какой периодичностью она может возникать и как долго длиться.

Как правило, перегрузка допустима, если режим, в котором она возникает, ограничен по времени. В качестве примера на рис. 2 дан суточный график нагрузки, имеющий часы повышенного потребления мощности. Возможность трансформатора работать с некоторой перегрузкой позволяет выбрать его номинальную мощность  $S_T$  не на максимум нагрузки, а на меньшую величину.

Допустимые перегрузки оборудования  $K_{\Pi}$  с учетом их длительности – это важнейшая информация, необходимая при проектировании электрических сетей. Также важным является и график нагрузки. Например, на рис. 2а видно, что нагрузка большую часть дня сохраняется на минимальном уровне, температура обмоток низка. Следовательно, здесь для трансформатора допустимы повышенные  $K_{\Pi}$ , и номинальная мощность  $S_T$  будет заметно меньше величины максимума нагрузки  $S_H$ .

На рис. 2б график нагрузки, в отличие от рис. 2а, более равномерен, и номинальная мощность  $S_T$  уже не так сильно отличается от максимума нагрузки  $S_H$ .

Очевидно, что совместный грамотный учет перегрузочной способности  $K_{\Pi}$  и суточного графика нагрузки дает основание применять трансформаторы, выбранные не на максимум нагрузки, а на меньшую величину. Такие трансформаторы будут дешевле.

Дадим далее оценки коэффициента  $K_{\Pi}$  для различных трансформаторов. Для сухих перегрузочная способность зависит от технологии изготовления [3]:

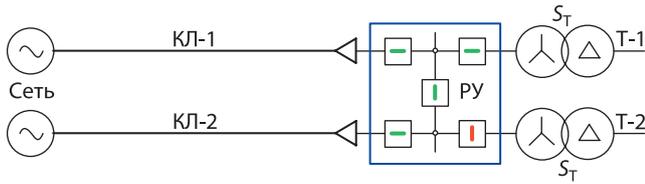
- для трансформаторов с литой изоляцией перегрузка не допускается и  $K_{\Pi} = 1$ ;
- для трансформаторов с «открытыми» обмотками допустима перегрузка на 20%, т.е.  $K_{\Pi} = 1,2$ .

Для масляных трансформаторов, в отличие от сухих, стойкость к перегрузкам исследована более детально, и в России действует соответствующий ГОСТ [4]. Он устанавливает метод расчета допустимых систематических нагрузок и аварийных перегрузок по задаваемым исходным данным, а также нормы таких нагрузок и перегрузок для суточного графика нагрузки трансформаторов с учетом температуры охлаждающей среды. Важными положениями [4] являются:

1. Допустимые систематические нагрузки не вызывают сокращения нормируемого срока службы трансформатора, так как за продолжительность графика нагрузки обеспечивается нормальный или пониженный против нормального расчетный износ изоляции.

### Схема питания подстанции с двумя установленными трансформаторами

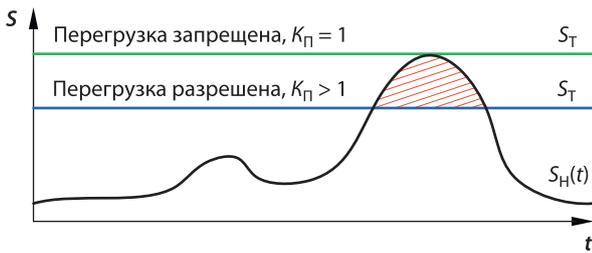
Рис. 1 •



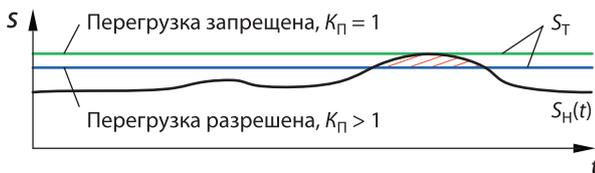
### Выбор номинальной мощности трансформатора по графику нагрузки:

Рис. 2 •

#### а резко переменный

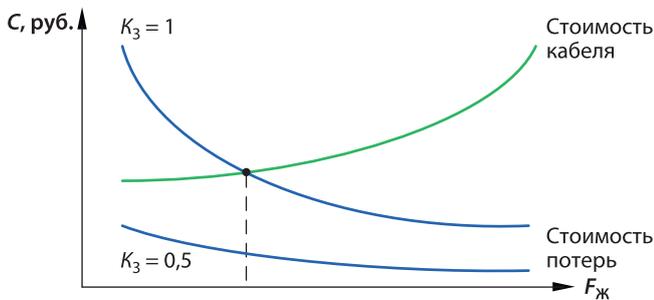


#### б равномерный



### Выбор оптимального сечения жилы с учетом стоимости кабеля и потерь

Рис. 3 •



2. Допустимые аварийные перегрузки вызывают повышенный по сравнению с нормальным расчетный износ изоляции, что может привести к сокращению нормированного срока службы трансформатора, если повышенный износ впоследствии не компенсирован нагрузками с износом витковой изоляции ниже номинального.

Например, по [4] при определенных условиях для масляных трансформаторов допустимо систематическое (ежедневное!) повышение нагрузки на 40% ( $K_{П} = 1,4$ ), а аварийные перегрузки могут достигать 60-80%.

Помимо коэффициента  $K_{П}$  для трансформаторов используют такое понятие, как коэффициенты загрузки  $K_3$ . В нормальном режиме, когда в работе находятся оба трансформатора (рис. 1), каждый из них несет половину нагрузки  $S_{Н}$ , и тогда коэффициент загрузки:

$$K_3 = \frac{S_{Н} / 2}{S_{Т}} = \frac{K_{П}}{2}. \quad (2)$$

Если для трансформатора не допускаются перегрузки или они возможны, но не приняты в расчет, то при выборе трансформатора по (1) полагается  $K_{П} = 1$  и тогда в нормальном

► режиме по (2) загрузка составляет всего  $K_3 = 0,5$ . Это означает следующее:

- почти весь срок службы трансформатор работает с загрузкой менее 50%;
- лишь в определенные часы суточного графика трансформатор работает при 50%;
- лишь несколько раз за срок службы возникает ситуация, когда из-за отключения соседнего трансформатора происходит работа при полной загрузке до 100%.

В рассмотренном случае, исключая перегрузки, приходится приобретать целый трансформатор, а пользоваться в лучшем случае половиной его номинальной мощности. К сожалению, в последние годы такие проекты совсем не редкость, даже когда речь идет о масляных трансформаторах, у которых согласно [4] имеется хорошая перегрузочная способность.

Если учесть, как это и положено, перегрузочную способность трансформатора, например  $K_{\Pi} = 1,4$ , то тогда в нормальном режиме  $K_3 = 0,7$ , что уже больше похоже на эффективное использование средств, вложенных в оборудование:

- почти весь срок службы трансформатор работает с загрузкой менее 70%;
- лишь в определенные часы суточного графика трансформатор работает при загрузке 70%;
- лишь несколько раз за срок службы возникает ситуация, когда из-за отключения соседнего трансформатора происходит работа при полной загрузке до 140%.

### КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

К сожалению, не каждое электрооборудование имеет методику расчета допустимых систематических нагрузок и аварийных перегрузок так, как это сделано для силовых масляных трансформаторов [4]. Причинами могут быть следующие:

- отсутствие необходимости в подобной методике (например, если оборудование не допускает перегрузки);
- недостаточный опыт эксплуатации для выпуска методики, которая учитывала бы вопросы расхода ресурса при перегрузках и его экономии при недогрузках.

В настоящее время в сетях 6–500 кВ все шире используются кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена. Как правило, кабельные линии имеют сразу две параллельные цепи, и при выборе сечения жилы (или номинальной мощности) появляются точно такие же вопросы, с которыми приходилось разбираться в схеме рис. 1 для двух параллельных трансформаторов.

К сожалению, сложившаяся практика такова, что при проектировании кабелей игнорируется их способность к перегрузкам и принимается  $K_{\Pi} = 1$ . Следовательно, коэффициент загрузки в нормальном режиме всего  $K_3 = 0,5$ . Иными словами:

- почти весь срок службы кабель работает с загрузкой менее 50%;
- лишь в определенные часы суточного графика кабель работает при 50%;
- лишь несколько раз за срок службы возникает ситуация, когда из-за отключения соседнего кабеля, происходит работа при полной загрузке до 100%.

На самом деле даже в часы максимума суточного графика нагрузки реальный (фактический) коэффициент загрузки кабелей зачастую оказывается не 0,5, а менее (например, 0,3–0,4). Дело в том, что при проектировании сетей нагрузка полагается не актуальной, а некоторой перспективной, определенной с учетом планов развития энергосистемы и роста потребления, которое зачастую так и остается на бумаге.

Учитывая высокую стоимость кабельных линий 6–500 кВ, достигающую десятков миллионов рублей за каждый километр трассы, их небольшая загрузка (по факту – не более 0,3–0,4) представляется расточительной. Выход из ситуации может быть найден, если по аналогии с трансформаторным стандартом [4] проработать для кабелей вопрос о допустимых систематических нагрузках и аварийных перегрузках.

Например, в [5] отмечено, что кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена могут перегружаться. На определенное число часов в году допустим их разогрев не до 90 °С, а до 105 °С. В [1] дана экспертная оценка, что такое увеличение температуры будет соответствовать росту передаваемой по кабелю мощности примерно на 10%, т.е. составит  $K_{\Pi} = 1,1$ . Такой коэффициент

заметно меньше, чем для трансформаторов по [4], но и он позволил бы в ряде случаев экономить на стоимости кабеля за счет снижения сечения жилы.

Учет способности кабеля перегружаться позволяет обосновать возможность применять сниженное сечение жилы, а значит – экономить на стоимости кабеля, но комментариив также требует и стоимость потерь в жиле, ведь она возрастет.

Стоимость потерь в жиле определяется главным образом режимом, в котором кабель работает большую часть времени, а, как было показано, это режим загрузки около  $K_3 \approx 0,5$ . В таком режиме потери мощности, пропорциональные квадрату тока, составят 0,25 о.е., т.е. в 4 раза меньше, чем если бы кабель работал на номинальной загрузке  $K_3 \approx 1$ . Несложно показать, что стоимость потерь уровня 0,25 о.е. за срок службы кабеля слишком мала в сравнении со стоимостью самого кабеля, и поэтому при выборе оптимального сечения жилы надо руководствоваться возможностью снижения стоимости кабеля, не обращая никакого внимания на некоторый рост стоимости потерь.

Графическая интерпретация высказанных соображений представлена на рис. 3, где показана стоимость кабеля и цена потерь в зависимости от сечения жилы. Выгодно брать такое сечение жилы, при котором будет минимальной стоимость владения кабелем, равная сумме стоимости кабеля и потерь в нем. Она достигается при сечении жилы, отвечающем точке пересечения кривых. Выбранное сечение далее следует проверить на способность пропускать токи нагрузки в ремонтных режимах, когда одна из двух цепей отключена.

Как следует из рис. 3 при коэффициенте загрузки  $K_3 \approx 0,5$  кривые стоимости кабеля и стоимости потерь пересекутся при столь малом сечении жилы, что его явно будет недостаточно для обеспечения необходимой пропускной способности в ремонтных режимах. Поэтому выбор жилы кабеля производится по соображениям обеспечения достаточной ее пропускной способности с учетом стойкости кабеля к перегрузкам, но никак не по критерию минимума потерь.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проекты в сфере электроэнергетики, реализуемые в последние годы, таковы, что оборудование сетей эксплуатируется при нагрузках, существенно меньших тех длительно допустимых значений, которые указаны в документации.

Причинами этого является своеобразный двойной запас при проектировании. Во-первых, ориентируясь на планируемое активное развитие электрических сетей, формируются завышенные требования к характеристикам оборудования. Во-вторых, уже при выборе оборудования ошибочно игнорируется неравномерность графика нагрузки и способность оборудования выполнять свои функции в условиях систематических и аварийных перегрузок.

С целью повышения эффективности электрических сетей рекомендуется более внимательно изучить допустимость перегрузок для различного вида оборудования по аналогии с тем, как это сделано в ГОСТ на масляные силовые трансформаторы.

В первую очередь целесообразно сосредоточить внимание на кабелях 6–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена в силу их высокой стоимости, а потому значительного экономического эффекта от учета способности перегружаться.

Есть основания полагать, что для таких кабелей допустимы перегрузки не менее чем на 10%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Выбор параметров загруженности кабельных линий 110-500 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2015. № 1(91).
2. Дмитриев М.В. Требования к компенсации зарядной мощности ВЛ 500-750 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2013. № 5(83).
3. Иванов С.Н. Сухие силовые трансформаторы. Разнообразие видов и параметров // Новости ЭлектроТехники. 2011. № 2(68).
4. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.
5. СТО 56947007-29.060.20.072-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования // ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.