

4. Г а м м А. З., К о л о с о к И. Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. – Новосибирск: Наука, 2000. – 152 с.

5. А н и щ е н к о В. А. К задаче контроля достоверности информации в АСУ ТП электростанции // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1985. – № 8. – С. 16–20.

6. А н и щ е н к о В. А., Горош А. В. Выбор замещающих значений при обнаружении недостоверных измерений аналоговых переменных // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 1. – С. 25–31.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 28.03.2003

УДК 621.311.1.014.019

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗНАЧЕНИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Докт. техн. наук ЕРХАН Ф. М.

Государственный аграрный университет Молдовы

Уровни токов короткого замыкания в электрических сетях различного класса напряжений носят вероятностный характер, зависят от ряда факторов как определенных, так и неопределенных и имеют решающее значение при выборе электрооборудования, графа развития электрических сетей и уровней напряжения.

Проблема оптимизации и координации ожидаемых уровней токов короткого замыкания в узлах электроэнергетических систем – весьма актуальна. Поэтому определение основных факторов, влияющих на значения уровней токов короткого замыкания и темпы их изменения в электрических сетях и узлах, позволит своевременно проводить их оптимизацию и ограничение роста.

Поскольку скорость изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях и узлах электроэнергетических систем носит вероятностный характер и дискретно изменяется, а кривая изменения носит нелинейный характер, важно разработать методы расчета ожидаемых уровней токов короткого замыкания с учетом факторов, влияющих на их значение и скорости изменения [1, 2].

Режимы возникновения КЗ могут быть самые разнообразные, поэтому при разработке математических моделей необходимо учитывать только те факторы, которые детерминированы и математически могут быть описаны соответствующими уравнениями [3].

Функция, описывающая зависимость скорости изменения ожидаемых уровней токов короткого замыкания от основных определенных факторов, математически может быть представлена следующим образом:

$$di_{SC}/dt = f[(dU_{пвн}/dt)_г; (dU_{пвн}/dt)_л; (dS_{КЗ}/dt)_г; (dS_{КЗ}/dt)_л; dZ/dt], \quad (1)$$

где di_{sc}/dt – скорость изменения ожидаемых уровней токов короткого замыкания в заданном узле системы; $(dU_{пвн}/dt)_г$ – то же повторно-восстанавливающегося напряжения в точке КЗ со стороны источников питания; $(dU_{пвн}/dt)_л$ – то же со стороны нагрузки; $(dS_{КЗ}/dt)_г$ – то же мощности КЗ в точке короткого замыкания со стороны источников питания; $(dS_{КЗ}/dt)_л$ – то же потребителей; dZ/dt – то же эквивалентного волнового сопротивления в точке КЗ.

Процесс короткого замыкания сопровождается возникновением электрической дуги, поэтому скорость прохождения процесса короткого замыкания и изменение тока короткого замыкания (di_k/dt) зависят от скорости изменения повторно-восстанавливающегося напряжения $U_{пвн}$ в точке КЗ.

Изменение составляющих $U_{пвн}$ во времени в зависимости от места КЗ приведено на рис. 1.

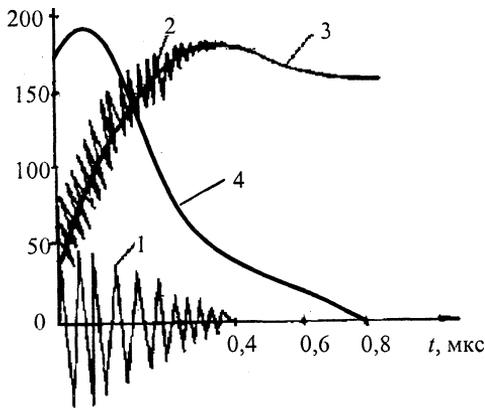


Рис. 1. Полное $U_{пвн}$ в системе 110 кВ при КЗ на расстоянии 1,5 км от шин ТП и выключателя: 1 – составляющая $U_{пвн}$ со стороны линии; 2 – полное $U_{пвн}$ на выключателе; 3 – составляющая $U_{пвн}$ со стороны источника; 4 – кривая изменения тока КЗ

Результирующее значение ПВН имеет две составляющие: со стороны источника питания $(dU_{пвн}/dt)_и$ и со стороны линии, на которой происходит переходный процесс $(dU_{пвн}/dt)_л$. Эти составляющие определяются из следующих расчетных выражений с учетом замкнутых контуров и их волновых сопротивлений:

$$(dU_{пвн}/dt)_л = Zdi_k/dt; \quad (2)$$

$$(dU_{пвн}/dt)_г = Z/(n-1)di_k/dt, \quad (3)$$

где n – количество ЛЭП, присоединенных к шинам источника, от которых может быть подпитана точка КЗ; Z – эквивалентное волновое сопротивление контура, где происходит КЗ.

Результирующее значение $U_{пвн}(t)$ с учетом изменения скорости определяется:

$$dU_{пвн}/dt = (dU_{пвн}/dt)_г + (dU_{пвн}/dt)_л = n/(n-1)Zdi_k/dt. \quad (4)$$

Способность электрооборудования (в частности, выключателя) отключать любой вид КЗ характеризуется скоростью изменения тока на контактах выключателя di_k/dt .

Если $0 < di_k/dt < 10$ А/мкс, то продолжительность горения дуги минимальна и выключатель способен отключить любой вид КЗ.

Если $25 < di_k/dt < 30$ А/мкс, то отключение любого вида КЗ становится проблематичным для любых выключателей, находящихся в эксплуатации.

В зависимости от величины ожидаемого тока КЗ, места его нахождения относительно выключателя процесс отключения тока КЗ характеризуется коэффициентом тяжести отключения (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость надежности срабатывания выключателей R и количества циклов до вывода их в ремонт $N(t)$ от значения отключаемого тока КЗ $I_{КЗ.н}$

$I_{от}/I_{КЗ.н}$	0,08	0,16	0,25	0,50	0,75	1,0
$N(t)$	32	26	20	15	12	10
$R(t)$	0,996	0,998	0,999	0,999	0,993	0,991
$R^1(t)$	25,0	50,0	100	100	14,3	11,1

Здесь $N(t)$ – количество циклов срабатывания выключателей; $R(t)$ – надежность выключателей, рассчитанная по классическому методу; $R^1(t)$ – то же, по интегральному критерию.

Коэффициент тяжести отключения характеризует степень влияния различных факторов на срабатывание выключателей и вероятность его срабатывания в момент короткого замыкания, а именно: значение тока КЗ, амплитуду и скорость его изменения, начальную скорость, амплитуду первого пика переходного восстанавливающегося напряжения, динамические усилия, действующие на контактах выключателя, температуру окружающей среды и другие факторы.

Исследование динамики изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях различного напряжения (6, 10, 35, 110 и 330 кВ) показывает, что она является функцией от ряда факторов, приведенных в (1).

Выявлено, что определяющую роль в значениях ожидаемых уровней токов КЗ и динамике их изменения играют установленная мощность генерирующих узлов и структурная схема соединения элементов в узлах системы, от которого зависит и мощность подпитки точки КЗ потребителями в случае возникновения короткого замыкания. От значения этих мощностей зависят и активное сопротивление проводников во время КЗ, и процесс теплового спада тока КЗ [4].

Рост установленной мощности электрических станций, единичной мощности генераторов и трансформаторов, ввод линий электропередачи напряжением 330 кВ и выше способствуют увеличению уровней токов КЗ в сетях различного напряжения ЭЭС. Так, с учетом динамики за пять лет рост максимальных токов КЗ составил: в сетях 10 кВ – до 16 %; 35 кВ – до 20 %; 110 кВ – около 25 %; 330 кВ – около 30 %.

Динамика изменения уровней токов КЗ в сетях различного класса напряжений ЭЭС разная, так как передаваемый поток мощностей изменяется, поэтому электрооборудование подвергается воздействию токов КЗ различной формы, величины и продолжительности. При этом переходные восстанавливающиеся напряжения имеют различные величины и скорости изме-

нения. Для изучения динамики изменения уровней токов КЗ были исследованы распределительные сети реальных ЭЭС, содержащие более 1400 узлов различного класса напряжений, в процессе их совершенствования с интервалом в пять лет. Максимальные значения ожидаемых уровней токов однофазного и трехфазного КЗ в сетях различного напряжения (во время зимних максимумов) и отключающая способность установленных выключателей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Год	Количество узлов N , шт.	Минимальное значение уровней токов КЗ, кА		Максимальное значение уровней токов КЗ, кА		Отключающая способность установленных выключателей $I_{от ном}$, кА
		$I_{SC}^{(3)}$	$I_{SC}^{(1)}$	$I_{SC}^{(3)}$	$I_{SC}^{(1)}$	
$U_{ном} = 10$ кВ						
1970	145	0,42	–	3,56		10...20
1975	178	0,50	–	4,24		
1980	246	0,61	–	5,12		
1985	312	0,73	–	6,19		
1990	392	0,90	–	7,43		
1995	405	1,13	–	6,32		
$U_{ном} = 35$ кВ						
1970	105	0,51	–	4,96	3,6	6,6...16,5
1975	128	0,72	–	6,39	5,8	
1980	142	0,87	–	10,7	8,7	
1985	175	0,92	–	14,3	12,6	
1990	201	1,12	–	18,7	15,4	
1995	276	0,96	–	15,4	11,9	
$U_{ном} = 110$ кВ						
1970	98	2,71	2,32	14,2	16,3	16...26,5
1975	112	3,3	3,1	19,8	24,0	
1980	126	4,3	4,1	25,6	31,1	
1985	144	5,1	4,9	27,6	34,8	
1990	167	5,7	5,3	33,8	38,4	
1995	172	6,1	5,9	29,6	33,7	
$U_{ном} = 330$ кВ						
1970	4	2,76	2,18	16,8	13,6	32,5
1975	6	3,2	2,93	21,0	24,6	
1980	10	4,48	4,11	27,2	33,0	
1985	16	5,26	5,1	28,7	36,45	
1995	21	5,91	5,7	23,2	30,16	

Расчетные значения ожидаемых уровней токов КЗ получены с учетом наличия в ЭЭС точек секционирования сетей. Деление сетей напряжением 110 и 330 кВ способствует снижению роста ожидаемых уровней токов КЗ примерно на 25...40 % по сравнению с сетью, в которой деление не осуществлялось.

Из табл. 2 следует, что уровни токов КЗ в сетях напряжением 10, 35, 110 и 330 кВ увеличиваются соответственно в 2,5; 3,1; 2,8 и 2,9 раза. Уровни токов короткого замыкания в некоторых узлах являются предельными

для установленного оборудования и создают трудности в эксплуатации. Поэтому необходимо ограничить их рост или заменить оборудование на более мощное. Необходимо отметить, что во всех сетях ЭЭС уровни токов одно- и трехфазного КЗ непрерывно растут, однако в сетях более высокого напряжения (110–330 кВ) темпы роста выше, чем в распределительных сетях 10–35 кВ. Это объясняется тем, что ввод установленной мощности в ЭЭС и передача электрической энергии осуществляются в основном по транспортным сетям (330 кВ и выше), и поэтому темпы роста ожидаемых уровней токов КЗ в них выше, чем в распределительных сетях других напряжений. Оказалось, что в исследуемых ЭЭС темпы роста уровней токов однофазного КЗ более высокие, чем у токов трехфазного КЗ. На узловых подстанциях ЭЭС токи однофазного КЗ на 5...15 % выше, чем токи трехфазного КЗ, а на шинах электростанций – на 15...30 %. Это приводит к резкому утяжелению условий работы электрооборудования (особенно выключателей), так как частота однофазных КЗ в 20...30 раз выше, чем трехфазных.

В связи с тем, что темпы роста ожидаемых уровней токов КЗ в ЭЭС высокие, возникает проблема согласования параметров электрооборудования с существующими и ожидаемыми уровнями токов КЗ, а также оценки и сравнения минимально необходимых затрат на повышение коммутационной способности выключателей и другого электрооборудования при отключении токов КЗ с затратами, необходимыми для ограничения роста уровней токов КЗ. Характерным для исследуемой ЭЭС является то, что узлы с максимальными уровнями токов КЗ находятся вблизи мощных источников, и с ее развитием возможно их изменение по сети. Результаты расчетов показывают, что из общего количества установленного электрооборудования в узлах исследуемой ЭЭС около 15...18 % подвергаются воздействию максимальных уровней токов КЗ, в остальной части ЭЭС уровни токов КЗ значительно ниже.

Воздействующие на электрооборудование и кабельные сети уровни токов КЗ во времени различаются по амплитуде, форме кривой, продолжительности и скорости их изменения, поэтому в реальных условиях необходимо выделить наиболее характерные режимы работы электрооборудования. Совокупность таких режимов работы позволяет определить нагрузочную способность электрооборудования и использовать при его выборе. Основой для выбора параметров электрооборудования являются:

- многочисленные расчеты ожидаемых уровней токов КЗ в узлах системы и динамика их изменения;
- расчет ожидаемой переходной скорости изменения восстанавливающегося напряжения;
- экспериментальные расчеты и прогнозирование ожидаемых уровней токов КЗ в узлах ЭЭС.

При установке электрооборудования в узлах ЭЭС важно исследовать его поведение при воздействии различных значений уровней токов. Выбор главных схем электрических станций и подстанций различного класса напряжения зависит от ожидаемых уровней токов КЗ в этих узлах. Повышение уровней токов КЗ означает снижение сопротивления и увеличение жесткости связи между источниками электроэнергии, источниками и потребителями, что ведет к повышению надежности системы.

Динамика изменения уровней токов одно- и трехфазного КЗ в сетях различного напряжения исследуемой ЭЭС имеет различный характер и зависит от ряда факторов:

- мощности короткого замыкания;
- сопротивления сети в точке КЗ;
- скорости изменения восстанавливающегося напряжения в точке КЗ и др.

Из анализа динамики изменения уровней токов КЗ следует, что между уровнями токов одно- и трехфазного КЗ существует определенная взаимосвязь, которая может быть выражена зависимостями, представленными на рис. 2, или аналитической зависимостью (5). Динамика изменения уровней токов КЗ показывает, что как в распределительных сетях, так и в сетях высокого напряжения ЭЭС они имеют тенденцию к постоянному росту, хотя интенсивность их повышения в распределительных сетях более низкая по понятным причинам.

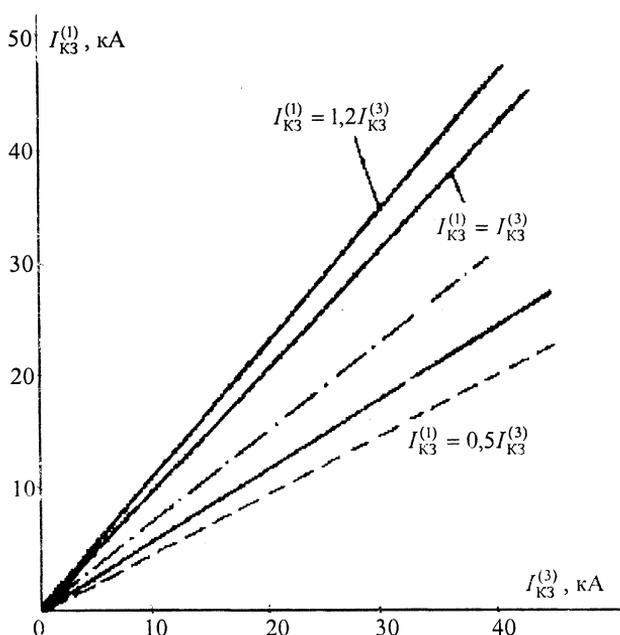


Рис. 2. Взаимосвязь между уровнями токов одно- и трехфазного КЗ в распределительных сетях

Рост уровней токов КЗ способствует изменению условий работы электрооборудования. Возникает задача согласования или координации параметров электрооборудования с существующими и ожидаемыми уровнями токов КЗ в сетях различного уровня напряжения.

Для решения этой задачи необходима достоверная информация о параметрах установленного электрооборудования и значениях ожидаемых уровней токов как трех-, так и однофазных КЗ, а также об основных факторах, влияющих на их значения.

Из анализа полученных значений и соотношений, представленных на рис. 2, следует, что между уровнями токов одно- и трехфазного КЗ существует линейная зависимость, которая может быть представлена зависимостью (5) согласно [3]

$$I_{SC}^{(1)} = 3/(2+n)I_{SC}^{(3)}. \quad (5)$$

Представленная зависимость (5) справедлива при условии, если сопротивления прямой и обратной последовательностей в точке КЗ равны. Максимальное значение токов однофазного КЗ $I_{K3}^{(1)}$ может достичь $1,5I_{K3}^{(3)}$ в идеальном случае. В нормальных условиях они изменяются в пределах

$$0,5 I_{K3}^{(3)} \leq I_{K3}^{(1)} \leq 1,2 I_{K3}^{(3)}. \quad (6)$$

Уравнение (5) показывает, что между токами трех- и однофазного КЗ может быть установлена линейная зависимость, а минимальные и максимальные значения описываются выражением (6).

ВЫВОДЫ

Динамика изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях зависит от передаваемой мощности по сетям данного класса напряжений, а ожидаемые значения уровней токов КЗ зависят от:

- скорости изменения повторно-восстанавливающегося напряжения в точке короткого замыкания со стороны источников питания;
- скорости изменения повторно-восстанавливающегося напряжения в точке короткого замыкания со стороны нагрузки;
- величины и скорости изменения мощности короткого замыкания в точке короткого замыкания со стороны источников питания;
- величины и скорости изменения мощности короткого замыкания в точке короткого замыкания со стороны потребителей;
- значения эквивалентного сопротивления в точке короткого замыкания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неклепаев Б. Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электроэнергетических системах. – М.: Энергия, 1978. – 151 с.
2. Отключенные токи в сетях высокого напряжения / Под ред. К. Рагаллера. – М.: Энергоиздат, 1981. – 326 с.
3. Ерман Ф. М., Неклепаев Б. Н. Токи короткого замыкания и надежность энергосистем. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 207 с.
4. Ерман Ф. М., Мелник С. Н. Исследование влияния уровней токов короткого замыкания на надежность узлов электроэнергетических систем // Токи КЗ в электроэнергетических системах: Труды III Междунар. симпоз. – Польша, 1988. – С. 80–87.
5. Ерман Ф. М. Взаимосвязь между токами короткого замыкания и надежностью электрооборудования // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1991. – № 11. – С. 13–17.
6. Ерман Ф. М., Абдель Р. С. Оптимизация уровней токов короткого замыкания в распределительных сетях 10–110 кВ с учетом их вероятностных характеристик // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1997. – № 11–12. – С. 34–38.

Представлена кафедрой
электротехники

Поступила 14.02.2003