

УДК 621.311

Г. П. Фастий, А. В. Бурцев, А. С. Карпов,
В. В. Ярошевич, Е. А. Токарева

Анализ условий работы трансформатора напряжения

В электрических сетях необходим постоянный контроль работы электрооборудования. Для выполнения этой задачи применяются измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения (ТН), от работы которых зависит точность электрических измерений, учета электроэнергии, а также надежность противоаварийной автоматики. Представлены результаты анализа условий формирования намагничивания трансформатора напряжения в режиме с односторонним подключением воздушных линий электропередачи, а также варианты нарушений в сети 110 кВ, которые могут существовать относительно большое время. Необходимо отметить, что рассматриваемая сеть обладает некоторыми особенностями: воздушные линии электропередачи, включенные последовательно, имеют значительную длину и небольшой уровень нагрузки, что может являться условием для возникновения емкостного эффекта линий электропередачи (эффект Ферранти), способного вызвать перенапряжения. Перенапряжения возникают при временных с точки зрения эксплуатации режимах работы, неблагоприятных сочетаниях параметров сети и могут длиться до тех пор, пока не изменится схема и режим сети. Наиболее часто они появляются в несимметричных режимах, при коротких замыканиях на землю и т. д. Рассмотрены несимметричные режимы, вызванные неполнофазными коммутациями и обрывом провода на воздушной линии, а также обрывом провода с последующим отключением силовых трансформаторов, которые могут влиять на уровень напряжения на ТН. Исследована возможность намагничивания ТН при длительном повышении напряжения в симметричных режимах, а именно: проявление эффекта Ферранти с различной нагрузкой на подстанциях вплоть до полного отключения и отключением силовых трансформаторов. Анализ условий работы измерительного трансформатора напряжения выполнен по материалам, предоставленным службами "Колэнерго".

Ключевые слова: трансформатор напряжения, подстанция, неполнофазный режим, воздушная линия, силовой трансформатор, обрыв провода.

Введение

Участок сети 110 кВ (рис. 1), соединяющий крупные населенные пункты и удаленные районы юга Мурманской области, вводился в эксплуатацию поэтапно с 2007 по 2015 гг. Он состоит из двух последовательно включенных воздушных линий электропередачи (ВЛ-1 и ВЛ-2), одной трансформаторной подстанции ПС-1, подключенной к точке соединения ВЛ-1 и ВЛ-2, и двух тупиковых подстанций ПС-2 и ПС-3, подключенных к ВЛ-2. Питание участка осуществляется от ПС-4.

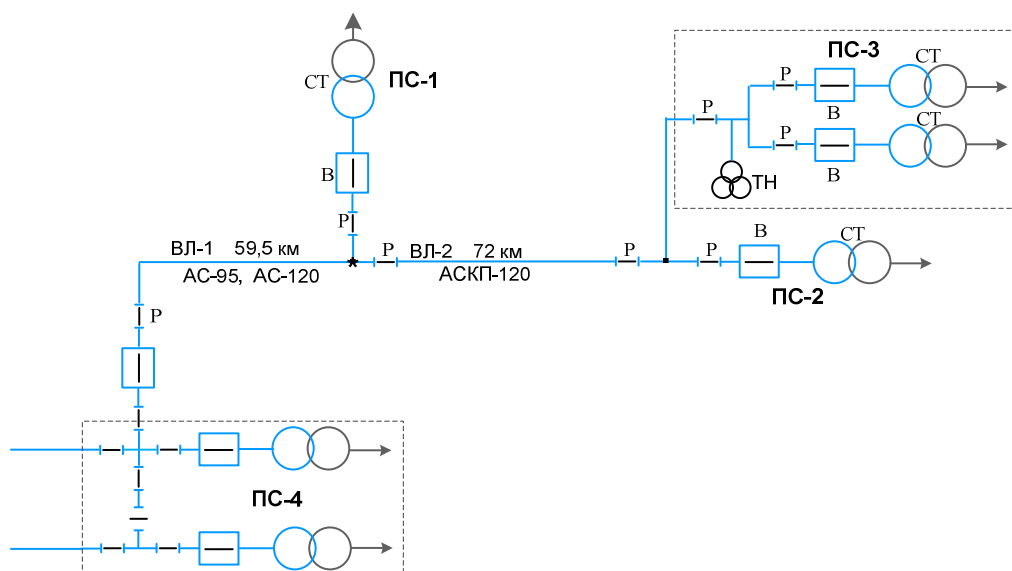


Рис. 1. Схема участка сети 110 кВ:

P – разьединитель; В – выключатель; СТ – силовой трансформатор;
ТН – трансформатор напряжения TVG-123

Fig. 1. The scheme of the 110 kV network section:

P – the disconnector; В – the switch; СТ – the power transformer;
ТН – the voltage transformer TVG-123

Особенностями этого участка являются:

- большая суммарная длина последовательно включенных ВЛ-1 и ВЛ-2 (131,5 км);
- большое внутреннее сопротивление системы, приведенное к шинам 110 кВ ПС-4;
- небольшая мощность трансформаторов, установленных на ПС-1, ПС-2 и ПС-3 (по 2 500 кВ·А);
- подключение трансформатора напряжения 110 кВ непосредственно к ВЛ-2 на стороне ПС-3.

Материалы и методы

Для схемы участка сети 110 кВ (рис. 1), подлежащей анализу, использовался программный комплекс. В расчетной программе используются методы интегрирования дифференциальных уравнений, которые обладают А-устойчивостью [1]. Для этой схемы строится ориентированный граф [2]. Части схемы, электрически не связанные, на орграфе изображаются отдельно. Расчетная схема может содержать до 160 обобщенных $R-L-C$ ЭДС ветвей. В программу заложены удобная модель многообмоточного трансформатора с линеаризованной кривой намагничивания, блок изменения параметров по времени, который реализует функции $R(t)$, $L(t)$ и $C(t)$. Этим блоком можно имитировать включение "нагрузки", меняя сопротивление большое на малое, в том числе равное нулю, также можно изменять шаг интегрирования. Программа формирует не только входной и выходной файлы данных, но и позволяет сформировать файлы данных промежуточного состояния (так называемую "контрольную точку"), что создает богатые возможности при многовариантных расчетах.

Результаты и обсуждение

Так как трансформатор напряжения (ТН) 110 кВ подключен непосредственно к ВЛ-2 (в самом ее конце), то возникает возможность повышения напряжения и тока подмагничивания ТН. Для определения степени опасности такого явления проведен анализ возникновения дополнительного тока намагничивания ТН при одностороннем включении ВЛ-2 под напряжение и при несимметричных режимах – неполнофазных коммутаций. Наибольшее рабочее напряжение анализируемого ТН согласно технической документации составляет 123 кВ.

Для анализа различных вариантов включения ВЛ и режимов на рис. 2 приведена эквивалентная расчетная схема (модель).

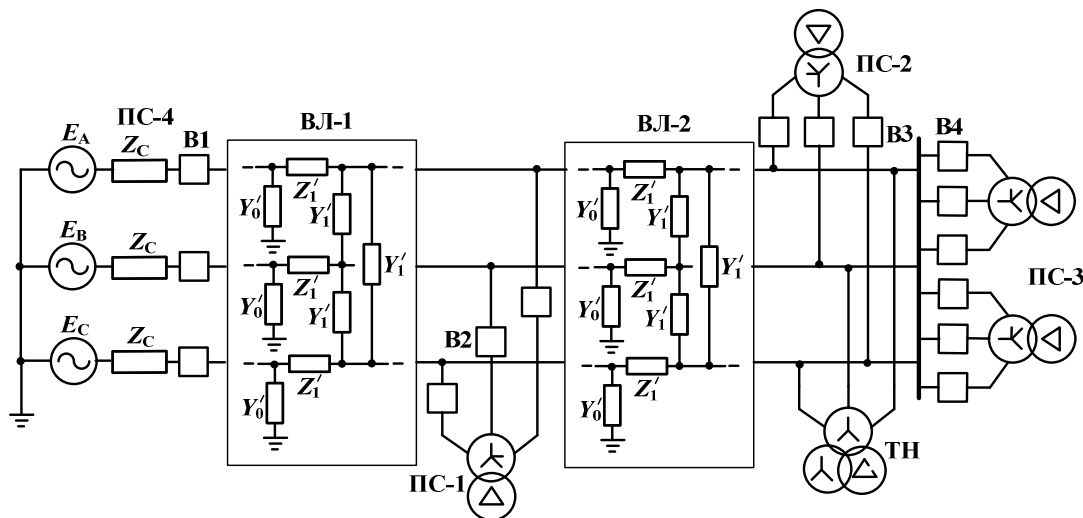


Рис. 2. Расчетная схема участка сети 110 кВ:

Z_C – сопротивление системы; В1, В2, В3 и В4 – выключатели соответственно подстанций ПС-4, ПС-1, ПС-2 и ПС-3

Fig. 2. The design scheme of the 110 kV network section:
 Z_C – the system resistance; В1, В2, В3 и В4 – the switches of substations PS-4, PS-1, PS-2 and PS-3

В расчетной схеме ВЛ-1 и ВЛ-2 представлены в виде линий с распределенными параметрами – погонными продольными сопротивлениями (Z'_1 , Z'_0) и поперечными проводимостями (Y'_1 , Y'_0), по "прямой последовательности" (Z'_1 , Y'_1) и по "нулевой последовательности" (Z'_0 , Y'_0).

Представленная на рис. 2 модель позволяет также рассчитывать характеристики воздействий на ТН ПС-3 в несимметричных режимах, включая неполнофазные коммутации со стороны питающей подстанции ПС-4, а также на ПС-1, ПС-2 и ПС-3. В этих вариантах коммутируются выключатели В1, В2, В3 и В4. При коммутациях на ПС-1, ПС-2 и ПС-3 меняется симметрия нагрузки на ВЛ-1 и ВЛ-2. Во всех

случаях учитывается магнитная связь между фазами подключенных силовых трансформаторов (СТ) и схема включения обмоток трансформаторов 100 кВ и 10 кВ.

Для оценки возможности намагничивания ТН при длительном повышении напряжения в симметричных режимах проведено исследование возможности проявления эффекта Ферранти. В качестве симметричных режимов работы участка с ВЛ большой протяженности рассмотрены различные варианты нагрузок на ПС-1, ПС-2, ПС-3 и ПС-4, включая варианты полного отключения нагрузки или силовых трансформаторов ПС-1, ПС-2, или ПС-3. По результатам расчетов получены значения фазных напряжений на шинах ПС-4, ПС-1, ПС-2 и на ТН 110 кВ ПС-3, которые сведены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, уровень напряжения в различных точках рассматриваемого участка сети существенно зависит от коэффициентов загрузки силовых трансформаторов подстанций. При полной загрузке трансформаторов напряжение на шинах всех подстанций снижается на 2–3 % по отношению к ЭДС системы и может быть меньше номинального. При уменьшении нагрузки проявляется действие емкостного тока ВЛ-1 и ВЛ-2, что приводит к повышению напряжения не только в конце ВЛ-2 (на ПС-2 и ПС-3), но и в начале ВЛ-1 и ВЛ-2, т. е. на шинах ПС-4 и ПС-1. Так, при снижении нагрузки на 50 % от номинальной (коэффициент использования – 0,5) напряжение превышает ЭДС системы на 3–5 %.

Таблица 1. Фазные напряжения в сети 110 кВ при симметричных режимах работы
Table 1. The phase voltages in the 110 kV network with the symmetric operation modes

№ вар.	Характеристика режима	Напряжение на шинах		
		ПС-4	ПС-1	ПС-2, ПС-3
1	Полная нагрузка на силовые трансформаторы ПС-4, ПС-1, ПС-2 и ПС-3	62,3 кВ	62,4 кВ	61,7 кВ
		98,06 %	98,16 %	97,1 %
2	Коэффициент загрузки силовых трансформаторов 0,5 на ПС-4, ПС-1, ПС-2 и ПС-3	65,6 кВ	66,5 кВ	66,5 кВ
		103,2 %	104,7 %	104,7 %
3	Коэффициент загрузки трансформаторов 0,5 на ПС-4, ПС-2 и ПС-3. Трансформатор ПС-1 отключен	67 кВ	68,2 кВ	68,2 кВ
		105,5 %	107,3 %	107,5 %
4	Коэффициент загрузки трансформаторов 0,5 на ПС-4, ПС-1 и ПС-3. Трансформатор ПС-2 отключен	66,7 кВ	67,7 кВ	68,1 кВ
		105 %	106,7 %	107,3 %
5	Коэффициент загрузки трансформаторов 0,5 на ПС-4, ПС-1 и ПС-2. Трансформаторы ПС-3 отключены	67,0 кВ	68,3 кВ	68,8 кВ
		105,6 %	107,6 %	108,4 %
6	Коэффициент загрузки трансформаторов 0,5 на ПС-4, ПС-1. Трансформаторы ПС-2 и ПС-3 отключены	70,3 кВ	72,3 кВ	73,8 кВ
		110,7 %	113,9 %	116,1 %

Примечание. Результаты расчетов представлены для ЭДС системы 110 кВ. Фазное напряжение в % дано относительно фазного номинального напряжения 63,5 кВ.

При отключении отдельных силовых трансформаторов на ПС-1, ПС-2 или ПС-3 (или аналогичном снижении нагрузки) напряжение в конце ВЛ-2 превышает ЭДС системы на 7,5–8,4 %. При полном отключении трансформаторов ПС-2 и ПС-3 превышение напряжения достигает 16 %. Указанное повышение напряжения вызвано наличием емкостного тока ВЛ-1 и ВЛ-2 и не полной его компенсацией реактивным током нагрузки, а также увеличением падения напряжения на индуктивности внутреннего сопротивления системы, приведенной к шинам ПС-4. В режимах снижения нагрузки или частичного отключения силовых трансформаторов на ПС-1, ПС-2 и ПС-3 возникает подмагничивание трансформатора напряжения, установленного в конце ВЛ-2. Мощность подмагничивания может достигать 14 кВ·А.

Необходимо учитывать влияние несимметричных режимов работы на уровень напряжения на ТН 110 кВ, которые вызваны неполнофазными коммутациями и обрывом провода ВЛ.

Варианты неполнофазных коммутаций нагрузки выполнялись для выключателей ПС-1, ПС-2 и ПС-3, а также для выключателей ПС-4. Расчеты показали, что указанные первые три варианта вызывают неравномерное распределение по фазам токов нагрузки, в основном в ВЛ-1 и ВЛ-2, и не вызывают существенных перекосов напряжения на ТН 110 кВ.

Влияние неполнофазных режимов рассматривалось для случаев обрыва проводов на ВЛ-1 и ВЛ-2, что соответствует также неполнофазным коммутациям ВЛ-1 на стороне ПС-4. Результаты расчетов вариантов неполнофазных режимов при полной загрузке силовых трансформаторов ПС-1, ПС-2 и ПС-3, равной номинальной мощности, сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что уровень повышения напряжения на шинах ПС-1 относительно ЭДС системы составляет 4,7 %, а на шинах ПС-2 и ПС-3 с ТН – 3,3 %.

Для режима – обрыв провода фазы "А" ВЛ-1 или отключение фазы "А" ВЛ-1 выключателем на ПС-4 (табл. 2, вариант 1) – приведены осциллограммы напряжений на шинах ПС-1, ПС-2 и ПС-3 (рис. 3, а, б), токов в силовом трансформаторе ПС-1 (рис. 3, в), суммарных токов в трех силовых трансформаторах ПС-2 и ПС-3 (рис. 3, г), СТ подстанции ПС-4 (рис. 3, д) и ток намагничивания в ТН 110 кВ, установленного в конце ВЛ-2 (рис. 3, е).

Таблица 2. Уровни фазных напряжений в неполнофазных режимах при полной нагрузке силовых трансформаторов ПС-1, ПС-2 и ПС-3
 Table 2. The levels of phase voltages in unbalanced modes at fully loaded power transformers of PS-1, PS-2 and PS-3

№ вар.	Характеристика режима	Напряжение на шинах		
		ПС-4	ПС-1	ПС-2, ПС-3
1	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-1	63,4 кВ	66,4 кВ	65,6 кВ
		99,9 %	104,7 %	103,3 %
2	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-2	62,4 кВ	62,6 кВ	62,2 кВ
		98,3 %	98,7 %	97,9 %

Примечание. Полученные фазные напряжения даны в виде эффективных значений. Величина в % дана относительно фазного номинального напряжения 63,5 кВ.

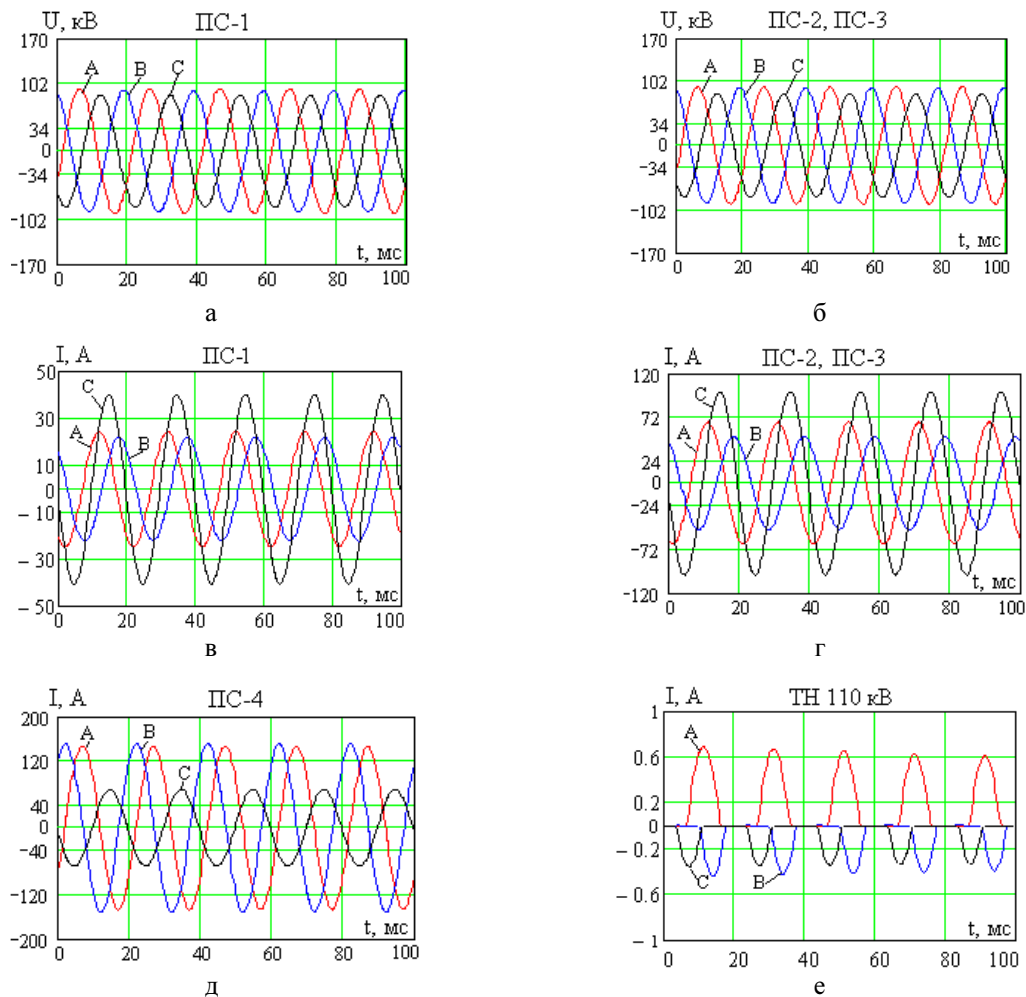


Рис. 3. Напряжение на шинах подстанций и токи в СТ и ТН 110 кВ, установленного в конце ВЛ-2.

Вариант номинальной нагрузки на силовые трансформаторы ПС-1, ПС-2, ПС-3

Fig. 3. The voltage on substations buses, the currents on 110 kV power transformer and voltage transformer, installed at the end of VL-2. The rated load option on the power transformer PS-1, PS-2, PS-3

Как видно из осциллограмм, приведенных на рис. 3, появляется несимметрия токов в силовых трансформаторах ПС-1, ПС-2 и ПС-3 с "опрокидыванием" фазы "С". В силовых трансформаторах ПС-4 также отмечается несимметрия токов с уменьшением тока фазы "С". Ток подмагничивания трансформаторов напряжения имеет несимметричный характер и увеличен на фазе "А", на которой смоделирован обрыв провода.

Анализ результатов расчетов неполнофазных режимов, вызванных обрывом провода ВЛ-1 или ВЛ-2, при уменьшении нагрузки на силовые трансформаторы подстанции рассматриваемого участка сети показал, что данный режим сопровождается увеличением напряжения на поврежденной фазе. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что наибольшее повышение напряжения (до 29,8 %) возникает на шинах ПС-1, ПС-2 и ПС-3. Наиболее опасным является режим, вызванный обрывом провода одной фазы ВЛ-1 или отключением одной фазы ВЛ-1 на ПС-4. На шинах ПС-4 также происходит повышение напряжения на 4,1–6,5 %.

Таблица 3. Уровни фазных напряжений в сети 110 кВ в неполнофазных режимах при неполной загрузке силовых трансформаторов (коэффициент загрузки 0,5)

Table 3. The phase voltages' levels in the 110 kV network in unbalanced modes at partial load of power transformers (the load factor is 0.5)

№ вар.	Характеристика режима	Напряжение на шинах		
		ПС-4	ПС-1	ПС-2, ПС-3
1	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-1	67,6 кВ	82,4 кВ	81,5 кВ
		106,5 %	129,8 %	128,4 %
2	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-2	66,1 кВ	67,3 кВ	68,6 кВ
		104,1 %	106 %	108 %

Наиболее показательные расчетные осциллограммы напряжения и токов, соответствующих обрыву одного фазного провода ВЛ-1 при нагрузке на силовые трансформаторы – 0,5 от номинальной мощности, приведены на рис. 4.

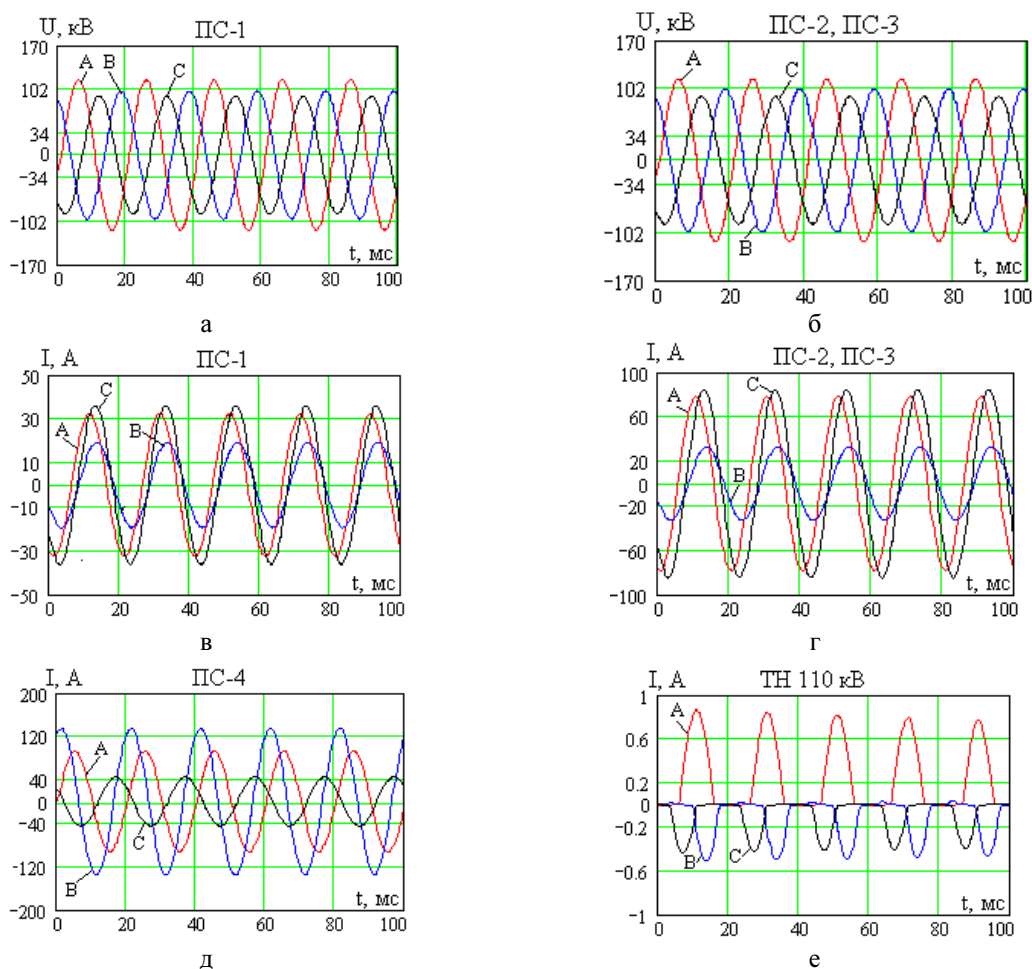


Рис. 4. Напряжение на шинах подстанций и токи в силовых трансформаторах подстанций, а также в ТН 110 кВ ПС-3. Токи и напряжения приведены по аналогии с рис. 3

Fig. 4. The voltage on substations buses, the currents on 110 kV power transformer and PS-3 voltage transformer. The currents and voltages are given by analogy with Fig. 3

При обрыве провода ВЛ-1 (рис. 4) несимметрия токов в трансформаторах увеличивается за счет уменьшения размагничивания магнитопроводов. На ПС-1, ПС-2 и ПС-3 кроме изменения соотношений величин фазных токов происходит искажение их фазы. Смещение фаз находится в одной четверти – в пределах 90°. В силовых трансформаторах ПС-4 также увеличивается несимметрия токов с увеличением разности величин и изменением фазы.

Ток подмагничивания ТН 110 кВ, установленного на ПС-3, несимметричен и увеличивается на поврежденной фазе в сравнении с вариантом полной нагрузки трансформаторов (рис. 3).

Большой интерес также представляют неполнофазные режимы, вызванные обрывом проводов с последующим отключением силовых трансформаторов на подстанциях ПС-1, ПС-2 и ПС-3. Такие режимы могут вызвать перекосы и повышение фазных напряжений.

Результаты расчетов неполнофазных режимов с отключением силовых трансформаторов при неполной нагрузке (коэффициент загрузки 0,5) приведены в табл. 4.

Таблица 4. Уровни фазных напряжений в сети 110 кВ в неполнофазных режимах работы при неполной нагрузке СТ (коэффициент загрузки 0,5), сопровождающиеся отключением силовых трансформаторов
Table 4. The phase voltages' levels in the 110 kV network in unbalanced modes at partial power transformers load (the load factor is 0.5) accompanied by disconnection of power transformers

№ вар.	Характеристика режима	Напряжение на шинах		
		ПС-4	ПС-1	ПС-2, ПС-3
отключение трансформатора на ПС-1				
1	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-1	68,6 кВ	100,7 кВ	98,6 кВ
		108 %	158,6 %	155,2 %
2	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-2	66,5 кВ	67,95 кВ	71,1 кВ
		104,7 %	107 %	108 %
отключение трансформатора на ПС-2 (или одного на ПС-3)				
3	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-1	68,7 кВ	91,4 кВ	90,6 кВ
		108,2 %	144 %	142,6 %
4	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-2	66,9 кВ	68,5 кВ	75,2 кВ
		105,3 %	107,9 %	108 %
отключение трансформаторов на ПС-3				
5	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-1	69,16 кВ	94,75 кВ	93,90 кВ
		108,9 %	149,2 %	147,9 %
6	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-2	67,25 кВ	69,087 кВ	77,71 кВ
		105,9 %	108,8 %	108 %
отключение трансформаторов на ПС-2 и ПС-3				
7	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-1	76,9 кВ	236 кВ	238 кВ
		121 %	371 %	375 %
8	Обрыв фазы "А" линии ВЛ-2	71 кВ	73,7 кВ	75,8 кВ
		112 %	116 %	119 %

Из представленных в табл. 4 результатов видно, что практически все случаи обрыва проводов ВЛ-1 или ВЛ-2 с последующим отключением силовых трансформаторов приводят к повышению фазного напряжения на одной из фаз до 100 кВ и выше. В варианте (7) полного отключения нагрузки ВЛ-2 в неполнофазном режиме вследствие магнитной связи через трансформатор ПС-1 между фазами под напряжением и поврежденной фазой ВЛ-1 происходит существенное повышение напряжения на этой фазе и на соответствующей фазе ТН. Кратность перенапряжений повышается до 3,7. На шинах ПС-4 также происходит увеличение напряжения на 21 %.

Наиболее показательные осциллограммы токов представлены в табл. 5.

Из осциллограмм видно, что все режимы сопровождаются значительными изменениями фаз токов в подключенных трансформаторах ПС-2, ПС-3 и в трансформаторе ПС-1. Расхождение фазных токов находится в пределах одной четверти (90°). В случае обрыва фазы "А" ВЛ-1 с последующим отключением СТ на ПС-2 и ПС-3 ток намагничивания ТН поврежденной фазы увеличивается до 2,5 А.

Таблица 5. Осциллограммы токов в силовых трансформаторах подстанций ПС-1, ПС-2, ПС-3 и ТН ПС-3
Table 5. The current waveforms in PS-1, PS-2, PS-3 power transformers and PS-3 voltage transformer

№ вар.	Характеристика режима	Ток намагничивания в ТН	Токи в СТ подстанций
1	Обрыв фазы "А" ВЛ-1 с отключением СТ на ПС-1		
2	Обрыв фазы "А" ВЛ-1 с отключением СТ на ПС-2		
3	Обрыв фазы "А" ВЛ-1 с отключением двух СТ на ПС-3		
4	Обрыв фазы "А" ВЛ-1 с отключением СТ на ПС-2 и ПС-3		

Заключение

Проведенные расчеты и анализ показали следующее.

1) Существенные повышения напряжений на шинах ПС-1, ПС-2 и ПС-3 возникают в неполнофазных режимах – обрывах проводов ВЛ-1 и ВЛ-2, а также при неполнофазных коммутациях ВЛ-1 на стороне ПС-4. Наибольшее повышение напряжения происходит на шинах ПС-1, ПС-2 и ПС-3 при обрыве одной фазы ВЛ-1 при неполной загрузке СТ и составляет 30 %.

2) Наибольшую опасность представляет отключение трансформаторов, сопровождающее неполнофазные режимы [3; 4]. Кратность перенапряжений на шинах ПС-1, ПС-2 и ПС-3 может достигать 3,7. При отключении трансформатора на ПС-1 повышение напряжения составляет 8–58 %.

При неполном отключении нагрузки ВЛ-2 и обрыве одной фазы ВЛ-1 повышение напряжения на ТН увеличивается до 49 %.

Наиболее опасными являются неполнофазные отключения или обрывы провода ВЛ-1 с полным отключением силовых трансформаторов ПС-2 и ПС-3. Напряжение на шинах ПС-1 и ТН 110 кВ повышается более чем в 3,5 раза.

Увеличение амплитуды фазного напряжения может достигать 130 кВ, а мощность подмагничивания – 20 кВ·А, что представляет опасность для трансформаторов напряжения.

Указанные режимы опасны также для оборудования ПС-4, где повышение напряжения может достигать 21 %.

В связи с возможностью существенного повышения напряжения на шинах ПС-1, ПС-2 и ПС-3 целесообразен анализ условий работы защитных аппаратов и корректировка их характеристик в соответствии с условиями эксплуатации.

При обрыве одной из фаз ВЛ-1 или ВЛ-2 недопустимо полное отключение нагрузки ВЛ-2.

Полученные значения колебаний и повышение напряжения на ТН 110 кВ при неполнофазных нарушениях показывают целесообразность использования трансформатора НКФ-132.

Библиографический список

1. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы. М. : Энергия, 1980. 638 с.
2. Сошинов А. Г., Бахтиаров К. Н. Математические задачи электроэнергетики. ВГТУ, 2012. 48 с.
3. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М., Смирнов А. А., Фастий Г. П. Исследование эмиссии электромагнитных возмущений во вторичную обмотку силового трансформатора // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 10 (28). С. 44–52.
4. Ярошевич В. В., Карпов А. А. Влияние нестационарных электромагнитных воздействий на силовые трансформаторы // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 8 (22). С. 54–62.

References

1. Chua L. O., Lin Pen-Min. Mashinnyi analiz elektronnykh shem: algoritmy i vychislitelnye metody [Computer analysis of electronic circuits: algorithms and computational methods]. M. : Energiya, 1980. 638 p.
2. Soshinov A. G., Bahtiarov K. N. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki [Mathematical problems of electric power industry]. VGTU, 2012. 48 p.
3. Burtsev A. V., Nevretdinov Yu. M., Smirnov A. A., Fastiy G. P. Issledovanie emissii elektromagnitnykh vozmuscheniy vo vtorichnyuyu obmotku silovogo transformatora [Investigation of the emission of electromagnetic disturbances into the secondary winding of a power transformer] // Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2015. N 10 (28). P. 44–52.
4. Yaroshevich V. V., Karpov A. A. Vliyanie nestatsionarnykh elektromagnitnykh vozdeystviy na silovye transformatory [Influence of non-stationary electromagnetic influences on power transformers] // Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2014. N 8 (22). P. 54–62.

Сведения об авторах

Фастий Галина Прохоровна – мкр. Академгородок, 21а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, науч. сотрудник;
e-mail: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Fastiy G. P. – 21a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Researcher;
e-mail: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Бурцев Антон Владимирович – мкр. Академгородок, 21а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник;
e-mail: a.burtsev@tehnord.ru

Burtsev A. V. – 21a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Junior Researcher;
e-mail: a.burtsev@tehnord.ru

Карпов Алексей Сергеевич – мкр. Академгородок, 21а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: info@ien.kolasc.net.ru

Karpov A. S. – 21a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: info@ien.kolasc.net.ru

Ярошевич Вера Васильевна – мкр. Академгородок, 21а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, науч. сотрудник;
e-mail: yaroshevich_vera@mail.ru

Yaroshevich V. V. – 21a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Researcher;
e-mail: yaroshevich_vera@mail.ru

Токарева Евгения Александровна – мкр. Академгородок, 21а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник

Tokareva E. A. – 21a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Junior Researcher

G. P. Fastiy, A. V. Burtsev, A. S. Karpov,
V. V. Yaroshevich, E. A. Tokareva

Analysis of operating conditions of the voltage transformer

In electrical networks, constant monitoring of the electrical equipment operation is necessary. To accomplish this task, current transformers and voltage transformers (VT) are used, on which the accuracy of electrical measurements, electricity metering, and the reliability of the emergency control system depend. The results of the analysis of the conditions for forming the magnetization of a voltage transformer in the mode with unilateral connection of overhead transmission lines, as well as variants of violations in the 110 kV network that may exist for a relatively long time have been presented. It should be noted that the considered network has its own peculiarities: the overhead transmission lines connected in series have a significant length and a low level of load, which may be a condition for the appearance of a transmission lines capacitive effect (the Ferranti effect), the latter can cause overvoltage. Overvoltage occurs when the operating modes are temporary in terms of operation, adverse combinations of network parameters take place, and can continue until the circuit and network modes change. Most often they appear in asymmetric modes, with short circuits to ground, etc. Asymmetric modes caused by incomplete-phase commutations and wire breaks on the overhead line, as well as wire breaks with subsequent disconnection of power transformers that can affect the voltage level on the VT have been considered. The possibility of VT magnetizing with a prolonged voltage rise in symmetric modes, namely, the manifestation of the Ferranti effect with various loads at substations up to complete switching-off and power transformers switching off has been investigated. The analysis of the measuring voltage transformer operating conditions has been based on materials provided by the "Kolenergo" services.

Key words: voltage transformer, substation, unbalanced mode, power line, power transformer, wire break.