

Предварительный анализ параметров сети для расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов

ФРОЛОВ О.В., ЧЕМБОРИСОВА Н.Ш.

Развитие сетей мегаполисов приводит к усложнению и повышению связности схем, увеличению токов короткого замыкания (ТКЗ). Актуально решение задачи эффективного ограничения ТКЗ при уменьшении числа точек секционирования сети. Эффективный предварительный анализ жесткости узлов до расчета установившихся режимов или ТКЗ и ограничение ТКЗ в жестких узлах в первую очередь.

Ключевые слова: электросети мегаполисов, схемы, короткие замыкания, токи, параметры

Перспективное развитие электроэнергетических систем, осуществляющих электроснабжение мегаполисов, требует усиления их сетей, что приводит к усложнению и повышению связности схем и, как следствие, к увеличению токов короткого замыкания (ТКЗ). Одной из мер по ограничению токов короткого замыкания (ОТКЗ) является секционирование сети, поэтому при развитии сетей возможно возрастание и числа точек секционирования. Следует отметить, что секционирование сети часто приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей, в некоторых случаях — понижению качественных показателей электроэнергии и росту потерь активной мощности и энергии в сети. При этом решение задачи эффективного ОТКЗ при уменьшении числа точек секционирования сети по условию недопустимых значений ТКЗ несомненно актуально.

Если полагать жестким узел, уровень напряжения которого слабо зависит от изменения нагрузки в этом узле, а узел с противоположным свойством считать сенсорным [1, 2], то одним из способов ограничения ТКЗ является снижение «жесткости» узлов схемы [3]. Оценить жесткость узлов можно до и после расчетов установившегося режима (УР), а сравнивать удобно в ранжированном списке узлов.

Для получения ранжированного списка узлов до расчета УР определяют реактивную составляющую ΔB_i разности ΔY_i между собственной Y_{ii} и суммой взаимных Y_{ij} проводимостей i -го узла [3, 4], позволяющую учитывать любые проводимости, подключенные к узлу. Следует отметить, что значения собственных и взаимных проводимостей можно

The development of power networks results in that their schemes become more complicated and interconnected, and in that short-circuit currents (SCCs) in them tend to increase. In this connection, the problem of efficiently limiting SCCs while decreasing the number of network sectioning points becomes important. Such problem can be efficiently solved by carrying out a preliminary analysis of the stiffness of nodes prior to calculate steady-state operating conditions or SCCs and limiting the SCCs primarily at stiff nodes.

Key words: electric networks of megapolises, schemes, short-circuit faults, currents, parameters

получить и из матрицы узловых проводимостей, формируемой при расчетах установившихся режимов, например с использованием ПВК RASTR. При ёмкостном характере ΔB_i узел будет жестким, при индуктивном — сенсорным, так как при значительных емкостных составляющих ΔB_i возможность генерации реактивной мощности и поддержки уровня напряжения в этом узле велики. Например, при П-образной схеме замещения линий электропередачи, которую часто применяют для расчетов режимов сетей, емкостная проводимость ветви подключается в равных долях к узлам, ограничивающим ветвь. При большом числе подключенных ветвей узел может стать достаточно жестким. Рассуждения справедливы для сети напряжением 110 кВ и выше, для которой, как и для сетей более низкого напряжения, такой эффект может также возникать при наличии подключенных к узлу трансформаторов, так как собственные и взаимные проводимости вычисляются с учетом коэффициентов трансформации. Кроме того, для предварительного анализа параметров сети возможно использование пересчитанной в шунт нагрузки в узле. Опыт расчетов показывает, что узлы при учете нагрузки остаются сенсорными или жесткими, т.е. учет нагрузки в узлах не изменяет радикально их характеристики. При расстановке номеров узлов по степени убывания или возрастания ΔB_i будет получен ранжированный список узлов, в одном конце которого соберутся жесткие узлы, а в другом — сенсорные. При учете нагрузки позиция узла в ранжированном списке может несколько изме-

ниться (на несколько позиций) или остаться неизменной.

Выделить наиболее жесткие узлы, на которые следует обращать особое внимание, можно по разным принципам, одним из которых может быть принцип по превышению ΔY_i некоторого значения, например 0,1. Если составляющая ΔB_i для какого-то узла стала меньше по модулю 0,1, то узлы, имеющие еще меньшее значение ΔB_i , можно подробно не рассматривать. Обработанный таким образом список дает возможность получить информацию о наиболее «жестких» узлах, ограничивать ТКЗ в которых необходимо в первую очередь, так как значение ТКЗ в жестком узле будет значительно больше, чем в сенсорном [5]. Заведомо жесткими узлами являются шины станций, поэтому далее они не рассматриваются.

При подключении (или отключении) батарей статических конденсаторов, токоограничивающих реакторов, резонансных устройств ограничения токов (РУОТ), секционировании или изменении топологии сети «жесткость» узлов изменяется, чем можно воспользоваться для ограничения ТКЗ. В связи с этим представляет интерес формализованный выбор мест ОТКЗ [5] при изменении «жесткости» узлов схемы с помощью подключенных в них устройств ОТКЗ (УОТКЗ) или секционирования сети. Предварительный анализ параметров сети для выбора мест установки УОТКЗ значительно повышает их эффективность.

Анализ и сопоставление результатов оценки жесткости узлов в перспективных схемах проводились на примере Московской и Ленинградской энергосистем, осуществляющих электроснабжение соответствующих мегаполисов и областей. Результаты, полученные до расчета режимов, приведены в таблице.

Энергосистема	Число узлов		
	жестких	сенсорных	всего
Московская	342 (18,6%)	637 (34,6%)	1843
Ленинградская	58 (12%)	158 (32,7%)	483
Московская ($ \Delta B > 0,1$)	268 (14,5%)	387 (21%)	1843
Ленинградская ($ \Delta B > 0,1$)	32 (6,6%)	69 (14,2%)	483

Примечания. В скобках — проценты по отношению к общему числу узлов в энергосистеме. Соотношение ($|\Delta B| > 0,1$) указывает на то, что выбирались узлы со значениями $|\Delta B|$, большими по модулю, и их число обрабатывалось так же, как в предыдущем пункте.

Соотношение числа жестких и сенсорных узлов в энергосистемах указывает на неоднородность схемы в плане ТКЗ. Поскольку в [6] показано, что

ОТКЗ в сетях одного уровня напряжения слабо влияет на ТКЗ в сетях другого уровня напряжения, то ранжированные списки узлов можно выстраивать отдельно для каждого уровня напряжения.

Оценить жесткость узла можно и по результатам расчета установившегося режима: чем меньше изменяется напряжение в узле при изменении его реактивной мощности, тем более жестким является узел. При проверке уровней напряжения в узлах в УР показательны результаты расчета напряжения в жестком и сенсорном узлах. Например, для двух узлов (шин 110 кВ) Московской энергосистемы изменение напряжения в сенсорном узле на 1 кВ потребует изменения реактивной мощности в этом узле на 40 Мвар, а в сенсорном — на 5,7 Мвар, т.е. в 7 раз меньше. Следует отметить, что значение ТКЗ в этом жестком узле превосходит в 2,5 раза ТКЗ в сенсорном узле. На шинах 330 кВ Ленинградской энергосистемы в жестком узле для изменения напряжения на 1 кВ необходимо изменение реактивной мощности на 100–120,5 Мвар; в сенсорном узле для этого потребуется 9,2–12,3 Мвар, т.е. на порядок меньше. Сопоставление результатов показывает, что для разных энергосистем (сетей разных классов напряжения в одной энергосистеме) степень изменения напряжения в жестких и сенсорных узлах, имеющих разную жесткость, может отличаться в несколько раз или на порядок.

Наиболее «жесткие» узлы, как правило, являются и наиболее неблагоприятными по уровню ТКЗ, поэтому вблизи от них следует располагать УОТКЗ или секционировать сеть. В то же время мероприятия, снижающие уровень ТКЗ, должны сопровождаться мерами, обеспечивающими регулирование напряжения и реактивной мощности в узле, поддержание напряжения при удаленных возмущениях и быстрое восстановление напряжения после близкого КЗ. В жестких узлах уровень напряжения поддерживается достаточно хорошо, поэтому размещение вблизи таких узлов УОТКЗ на основе реакторов может не приводить к значительным изменениям напряжения не только в жестком узле, но и в его ближайшем окружении [7]. В сенсорных узлах изменение напряжения более значительно, поэтому необходима проверка уровней напряжения в установившемся режиме с учетом установки, например стационарных реакторов. Необходима также проверка токовой загрузки близлежащих линий по нагреву, так как установка реакторов может привести к перераспределению перетоков (токов) в линиях. Таким образом, оценка жесткости узлов до расчета установившегося режима или ТКЗ является эффективной и позволяет существенно упростить расстановку УОТКЗ и в несколько раз снизить

объем расчетов, которые проводятся только для предварительно отобранных узлов.

Уменьшить «жесткость» узлов с целью ограничения ТКЗ можно различными способами. Одним из них является использование специальных устройств в этих узлах или на отходящих линиях электропередачи, другим – секционирование сети [8, 9]. При этом предполагается, что использование УОТКЗ в отличие от секционирования не приводит к существенному снижению показателей надежности электроснабжения и режимной управляемости.

В тех случаях, когда ТКЗ превышает значения максимальной отключающей способности выключателей, эффективно применение быстродействующих управляемых токоограничителей (БДУТО) [10], снижающих ток КЗ до значений, которые способны коммутировать выключатели. Основные преимущества применения коммутационных ограничителей тока изложены в [10]. Их использование эффективно при необходимости упреждающего секционирования сети при КЗ.

Стационарные токоограничивающие реакторы, в отличие от РУОТ, являются элементами, в большей степени, чем РУОТ, влияющими на установившийся режим, поэтому их установка в линии в некоторых случаях нежелательна. Более логична установка токоограничивающих реакторов последовательно с секционными или междушинными выключателями, а РУОТ или БДУТО – в линии электропередачи. Следует отметить, что стоимость реакторов в несколько раз меньше, чем стоимость РУОТ, что может послужить обоснованием для использования стационарных реакторов при выявлении их слабого влияния на установившийся режим.

Повышение связности схемы, в состав которой входит несколько жестких узлов, находящихся электрически близко друг к другу, сопровождается ростом ТКЗ. В таких случаях выходом из складывающейся ситуации является установка реакторов в связи жестких узлов между собой или отключение таких связей (секционирование сети). Если число таких связей, примыкающих к одному узлу, велико, то в узле можно рекомендовать установить многомодульную вставку постоянного тока, позволяющую секционирование сети одновременно по нескольким связям, но стоимость такой многомодульной вставки на один-два порядка больше, чем РУОТ [11].

На этапе проектирования ещё одним способом снижения «жесткости» узлов является подключение линий с большой емкостной проводимостью к другим, менее «жестким», узлам (системам или

секциям шин). В этом случае ограничение ТКЗ получается за счет снижения «жесткости» отдельных узлов (систем или секций шин), характеризующихся высокими ТКЗ. Возможным вариантом ограничения ТКЗ является переключение двух линий с примерно одинаковыми параметрами, одна из которых с меньшими токами подпитки при КЗ на шинах подключается к наиболее «жесткому» узлу (секции шин), а другая с большими токами подпитки – к наименее «жесткому» узлу.

Для оценки эффективности оценки жесткости узлов на этапе проектирования рассматривается режим одной из подстанций (ПС) Московской энергосистемы с двумя секционированными системами шин на напряжении 110 кВ. Отдельные секции шин могут рассматриваться как узлы, каждый из которых характеризуется своей жесткостью. Даже при секционировании сети на шинах этой ПС ТКЗ в перспективном режиме в самом «жестком» узле (секции шин) превышают отключающую способность установленных выключателей на 12%. При замыкании секционных выключателей (ликвидация секционирования) это значение возрастает до 51%. Снижение ТКЗ можно получить при включении последовательно с секционными выключателями реакторов и включении РУОТ в каждую из двух отходящих линий с наибольшими токами подпитки. Альтернативным вариантом вместо включения РУОТ является переключение двух линий электропередачи так, как это описано ранее. При этом ток в самом «жестком» узле снижается и становится меньше коммутационной способности выключателей на 11,3% [7]. Токи на остальных секциях шин ещё меньше. Сопоставление полученных результатов с вариантом с РУОТ указывает на эффективность предлагаемой меры по ограничению ТКЗ – включения последовательно с секционными выключателями реакторов при переключении двух линий электропередачи.

Были проанализированы результаты расчета УР для рассматриваемых секций шин до и после установки реакторов и переключения линий. До ввода ОТКЗ (секционированная сеть) отклонение напряжения от номинального значения на одной из секций шин составляет 6,1%, что больше длительно допустимого отклонения напряжения [12]. При ликвидации секционирования сети и учете сопротивления подключенных для ограничения ТКЗ устройств максимальное отклонение напряжения от номинального значения на секциях шин ПС составляет допустимые 5%, потери активной мощности снижаются на 2 МВт, т.е. установившийся режим становится допустимым и более экономичным.

Эффективность предложенного варианта ограничения ТКЗ была проверена и в ремонтных схемах. Результаты расчетов в этих схемах показали, что максимальные ТКЗ в ремонтных схемах на шинах рассматриваемой ПС ниже предельных значений по условию отключающей способности установленных выключателей. В варианте без ОТКЗ в ремонтных режимах ТКЗ становятся больше допустимых по условию отключающей способности выключателей.

В энергосистеме, осуществляющей электро-снабжение Санкт-Петербурга и Ленинградской области, были также выявлены наиболее жесткие узлы в сети напряжением 110 кВ и проведено сопоставление значений ТКЗ на их шинах, результаты которого приведены далее:

Подстанция	ПС1	ПС2	ПС3	ПС4	
Максимальный ТКЗ, кА	86,1	61,6	96,0	95,7	
Подстанция	ПС5	ПС6	ПС7	ПС8	ПС9
Максимальный ТКЗ, кА	93,6	87,8	56,6	73,1	83,0

Сопоставление значений ТКЗ в наиболее жестких узлах, выявленных до расчета УР или ТКЗ, позволяет сделать вывод об эффективности предварительного формирования и анализа списка наиболее жестких узлов с последующим ограничением ТКЗ в них в первую очередь.

Одним из мероприятий по ОТКЗ является разделение жестких узлов – отключение соединяющих их линий. Для примера рассматривался вариант с полным разделением жестких узлов – отключением линий ПС1–ПС5 (ТКЗ на шинах ПС1 снизился на 66,2%, а на ПС5 – на 17,5% по отношению к максимальному значению ТКЗ на шинах соответствующей ПС) и частичным разделением – отключением одной из соединяющих линий ПС8 – ПС4 (ТКЗ на шинах ПС4 снизился на 8,9%, а на шинах ПС8 – на 71,8% для остающейся в работе линии). Аналогично можно проверить и другие связи жестких узлов друг с другом. Таким образом, разделение жестких узлов может оказаться эффективной мерой по ограничению ТКЗ в конечных узлах.

Аналогичные результаты были получены для примера в сети напряжением 330 кВ:

Подстанция	ПС10	ПС11	ПС12	ПС13
Максимальный ТКЗ, кА	42,2	55,3	52,4	53,1

Разделение секций шин на ПС11 позволяет снизить ТКЗ на шинах этой ПС на 36,6% по отно-

шению к максимальному значению ТКЗ. Установка реактора в связи ПС12–ПС11 позволяет снизить ТКЗ на ПС12 на 11,3%, на ПС11 – на 10%. Установка в дополнение к этой мере реактора в связь ПС13 – ПС10 снижает ТКЗ на этих ПС на 7,1% и 13,2%, а на ПС12 и ПС11 – на 13,6% и 14,9% соответственно. Таким образом, и в сети 330 кВ выявление жестких узлов и их использование для установки УОТКЗ позволяет снизить уровень ТКЗ.

Выводы. 1. Предварительный анализ жесткости узлов до расчета установившихся режимов или ТКЗ позволяет значительно уменьшить объем расчетов, необходимых при расстановке УОТКЗ.

2. К ограничению ТКЗ может привести разделение электрически связанных жестких узлов (секционирование сети) или установка УОТКЗ в связи между ними. Эффективны также меры по снижению жесткости таких узлов: отключение выключателей между секциями или системами шин; включение реакторов последовательно с выключателями секций или шин; отключение линий, имеющих значительную емкостную проводимость; переключение линий, при котором линия со значительными токами подпитки КЗ подключается к менее жесткому узлу (секции или системы шин), а с меньшими токами подпитки – к более жесткому узлу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савоскин Н.Е. Надежность электрических систем. – Пенза: Изд-во Пензенского ГУ, 2004.
2. Войтов О.В., Воропай Н.И., Гамм А.З. и др. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 1999.
3. Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш. Оценка жесткости узлов схемы при ограничении токов короткого замыкания в сетях мегаполисов. – Сб. докладов XX конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем» (Москва, 1–4 июня 2010). – М.: Научно-инженерное информационное агентство, 2010.
4. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечулин В.Л. Теоретические основы электротехники. – СПб: Питер, 2003.
5. Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш. Основные положения методики рациональной расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполиса. – Сб. докладов III Международ. научно-практ. конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2008, т.2.
6. Игнатов В.В., Мисриханов М.Ш., Мозгалёв К.В., Шунтов А.В. О взаимном влиянии электрических сетей при ограничении токов короткого замыкания в энергосистеме Московского региона. – Электрические станции, 2008, № 6.
7. Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш. Повышение эффективности расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов. – Новое в российской электроэнергетике, 2011, № 4.

8. **Руководящие** указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/Под ред. Б.Н. Неклепаева. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.

9. **Неклепаев Б.Н.** Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. — М.: Энергия, 1978.

10. **Елагин, Мальшев А., Дементьев Ю.** Коммутационные ограничители тока. Основные преимущества применения. — Новости электротехники, 2009, №1 (55).

11. **Балыбердин Л.Л., Дьячков В.А., Капитула Ю.В., Лозинова Н.Г.** Многомодульные вставки постоянного тока. — Электрические станции, 2010, № 11.

12. **ГОСТ 13109-97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Изд-во стандартов, 1997.

[18.01.12]

Авторы: Фролов Олег Валерьевич окончил в 1995 г. Ленинградский политехнический институт по специальности «Электроэнергетические системы и сети». В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация режимов энергосистемы Северо-Запада на основе применения фазорегулирующих устройств» в Санкт-Петербургском государственном университете. Генеральный директор ОАО «НИИПТ».

Чемборисова Наиля Шавкатовна окончила в 1974 г. Ташкентский политехнический институт по специальности «Электроэнергетические системы и сети». В 2004 г. защитила докторскую диссертацию «Обобщенные показатели в задачах управления установившимися режимами ЭЭС» в ИСЭМ СО РАН. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ МЭИ.