

ВЛИЯНИЕ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

А.И. ФЕДОТОВ*, К.Р. БАХТЕЕВ*, А.В. ЛЕОНОВ**

*Казанский государственный энергетический университет

**АО «АК «Уралтранснефтепродукт», г. Уфа

В статье рассматриваются возможности малой распределенной генерации по обеспечению требуемого уровня остаточного напряжения на промышленных нагрузках при коротких замыканиях в системе электроснабжения. Определяется способность оборудования оставаться при таких возмущениях в работе с помощью математического моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрические сети, малая генерация, остаточное напряжение, качество электроэнергии, провал напряжения.

Основной целью функционирования электроэнергетической отрасли является надежное и экономичное снабжение потребителей электрической энергией требуемого качества. Надежность электроснабжения потребителей является одной из характеристик эффективности электроэнергетической системы [1]. Перебои (особенно крупные) в электроснабжении по масштабам ущерба могут быть причислены к наиболее опасным видам бедствий, наносящим удар по национальной экономике и по благополучию людей. Особенно остро проблема надежности стоит перед промышленными предприятиями как основными потребителями электроэнергии с большим количеством электродвигательной нагрузки. Любые перебои в их энергоснабжении приводят к нарушениям технологических процессов. Для ряда производств ущерб от провалов напряжения, с учетом перезапуска технологических процессов, сопоставим с ущербом от длительных перерывов питания, в то время как частота возникновения провалов напряжения выше на несколько порядков [2–4]. Для отечественных систем электроснабжения ситуация усугубляется наличием большого количества физически и морально устаревшего основного оборудования и устройств защиты и автоматики, что ведет к увеличению частоты возникновения отказов и увеличению длительности провалов напряжения. Все это приводит к снижению показателей надежности систем электроснабжения и обуславливает необходимость поиска путей решения данной проблемы.

Кратковременные нарушения электроснабжения (КНЭ) в виде коротких замыканий (КЗ) оказывают особенно ощутимое влияние на непрерывные производственные процессы на химических, нефтеперерабатывающих, машиностроительных и других предприятиях со сложной технологической цепочкой выпуска продукции. Спецификой для ряда станций перекачки газа, нефти и нефтепродуктов можно считать наличие субабонентов [4, 5], которые получают питание от воздушных линий электропередачи на том же напряжении, что и система внутреннего электроснабжения. В результате последняя становится чувствительной к коротким замыканиям на воздушных линиях.

В последнее время широкое развитие получает малая распределенная генерация (МРГ) – малые генерирующие источники, подключаемые к распределительной

электрической сети. Особенно значительные успехи в этой области достигнуты ОАО «Газпром». Подключение устройств МРГ технически осуществимо для станций перекачки нефти за счет использования энергии попутного газа, а для станций перекачки нефтепродуктов – за счет использования части транспортируемых энергоносителей с соответствующей их оплатой. Ниже рассматривается влияние форсировки возбуждения синхронных генераторов (СГ), используемых в МРГ, на глубину провалов напряжения, вызываемых трехфазными короткими замыканиями на воздушных линиях электропередачи субабонентов, с целью оценки требований к кратности форсировки возбуждения устанавливаемых генераторов.

В этой связи разработана модель энергосистемы с МРГ в среде *MATLAB* [6] (рис. 1), схема замещения показана на рис 2.

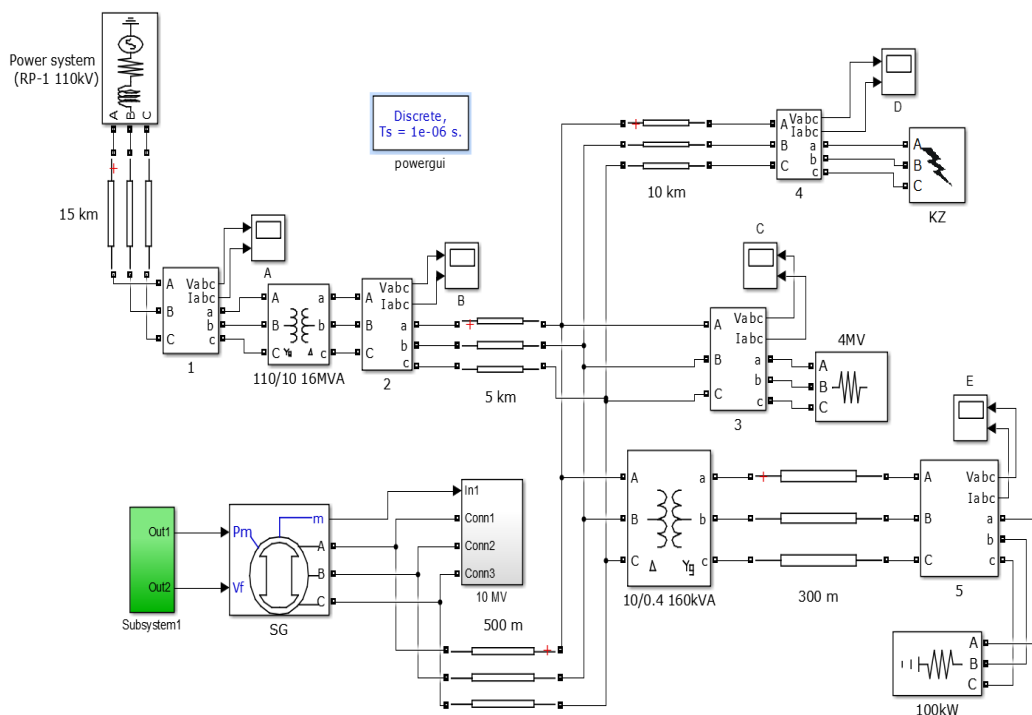


Рис. 1. Модель электрической сети с малой генерацией в среде *MATLAB*. (т. В – системообразующая подстанция), (т. С – крупный промышленный потребитель), (т. Е – население и приравненные к ним потребители)

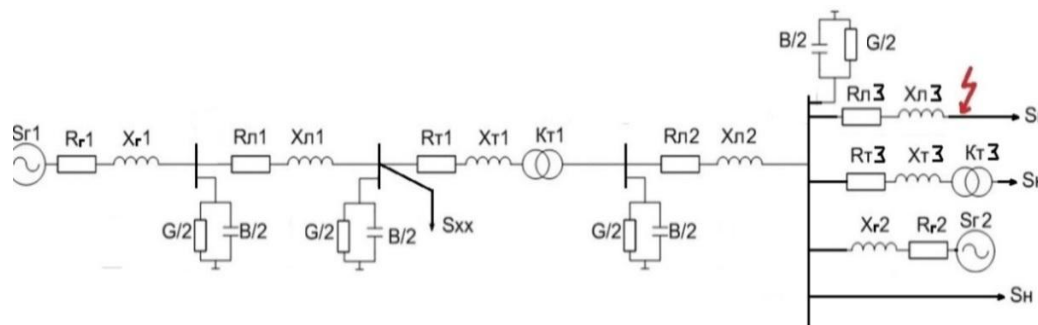


Рис. 2. Схема замещения моделируемой электрической сети

Данная модель позволяет оценить возможность влияния СГ на глубину провалов напряжения при КНЭ с учетом воздействия двух факторов: кратности форсировки возбуждения СГ и изменения мощности генератора.

Параметры схемы замещения следующие: система Sg1 имеет отношение $X/R=0,7/0,1$; длина линии Л1=15 км, линии Л2=5 км, расстояние до места КЗ на линии Л3 изменялось в пределах от 1 до 30 км. Удельные активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности линий: $X_{л10}=0,37$ Ом/км, $X_{л010}=1,57$ Ом/км, $R_{л10}=0,57$ Ом/км, $R_{л010}=0,72$ Ом/км. Поперечные проводимости линий, одинаково обозначенные на рис. 2 как В/2 и G/2 для линий Л1 и Л2, обнулялись при задании параметров линий на соответствующих элементах рис. 1. Параметры генератора Sg2: $X_d=1,805$ о.е., $X_q=0,474$ о.е., $X_d'=0,214$ о.е., $X_d''=0,101$ о.е. (на рис. 2 условно представлены индуктивным сопротивлением X_{g2}). Мощность генератора принималась равной 16 МВт и 8 МВт. Мощность нагрузки, рис. 2, $S_n=10$ МВт. Параметры трансформатора T1: $S_{ном}=25$ МВт, параметры первичной обмотки $U_1=110$ кВ, индуктивность рассеивания $L_1=0,08$ о.е., параметры вторичной обмотки: $U_2=10$ кВ, $L_2=0,08$ о.е.

КЗ производилось в месте, указанном на рис. 1, линия Л3, на разной удаленности от общих шин, на которых измерялся уровень остаточного напряжения. Защита от потери питания (ЗПП) улавливает характерные признаки в течение 0,02–0,04 с. В нашем примере время срабатывания форсировки составило 0,12 с (рис. 3).

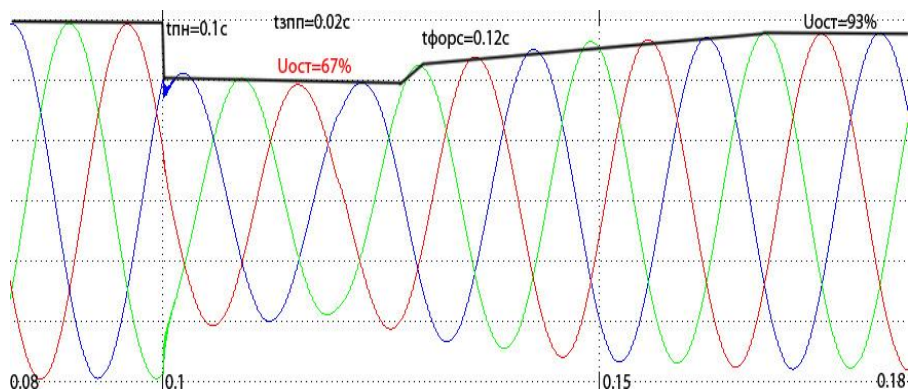


Рис. 3. Время срабатывания форсировки возбуждения

По результатам проведенного исследования при форсировке возбуждения СГ была выявлена зависимость остаточного напряжения от удаленности КЗ, результаты показаны на графике (рис. 4).

Как видно из графика, форсировка возбуждения СГ существенно сокращает граничную длину электропередачи [3, 4], т.е. ту зону электрической сети, внутри которой все КЗ приводят к глубине провала напряжения меньше технологически допустимого. Так, принимая, что остаточное напряжение на секции шин, от которых питается нагрузка, не должно быть ниже 0,8 о.е., получаем (рис. 4), что при отсутствии форсировки граничная длина электропередачи равна 22 км; при двукратной форсировке – 10,8 км; при трехкратной – 6,5 км. Тем самым количество КНЭ, приводящих к недопустимым провалам напряжения, в первом случае снижается в 2,04, во втором – в 3,38 раза.

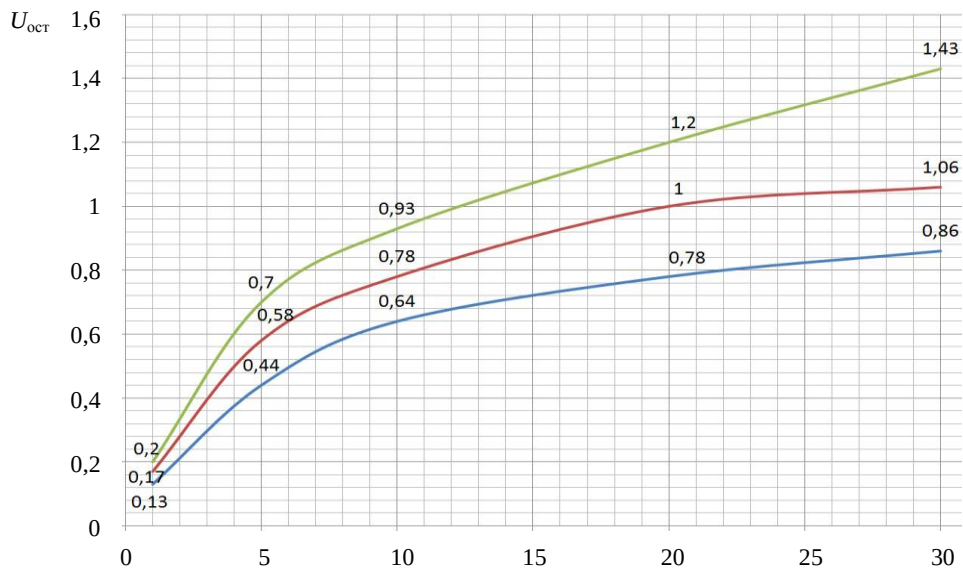


Рис. 4. Выявление граничной длины линии электропередачи в т.С:

— без форсировки; — с 2-кратной форсировкой; — с 3-кратной форсировкой

Вторым фактором, оказывающим влияние на провал напряжения, как уже отмечалось выше, является мощность СГ. Как показывают результаты моделирования, при КЗ на расстоянии 10 км, снижение мощности СГ в два раза при двукратной форсировке возбуждения приводит к уменьшению напряжения на 6%, а при трехкратной – на 4% (таблица).

Таблица

Уровень остаточного напряжения в зависимости от мощности СГ

Мощность генератора	16 МВт	8 МВт
Без форсировки возбуждения	0,64 $U_{ном}$	0,51 $U_{ном}$
С 2х кратной форсировкой	0,78 $U_{ном}$	0,72 $U_{ном}$
С 3х кратной форсировкой	0,93 $U_{ном}$	0,89 $U_{ном}$

В принятой модели системы электроснабжения при установке СГ мощностью 8 МВт из сети будет потребляться активная мощность; при установке СГ мощностью 16 МВт в сеть будет отдаваться избыточная мощность, но при этом возрастает уровень токов КЗ в системе внутреннего электроснабжения. Граничная длина для СГ меньшей мощности возрастает при двукратной форсировке до 14 км, а при трехкратной – до 7 км. Последнее обстоятельство очень важно: повышение кратности форсировки позволяет устанавливать СГ меньшей мощности при незначительном уменьшении граничной длины электропередачи.

Полученные результаты математического моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Форсировка синхронного генератора эффективна при провалах напряжения. На повышение уровня остаточного напряжения оказывает влияние как мощность генератора, так и кратность форсировки возбуждения.

2. Выбор номинальных параметров генераторов системы внутреннего электроснабжения целесообразно производить в координации с требованием по ограничению глубины провала напряжения.

Статья подготовлена в процессе выполнения НИР «Методы повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии в распределительных электрических сетях», задание № 2014/448 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.

Литература

1. Калявин В.П. Надежность и диагностика элементов электроустановок: учебное пособие для вузов / В.П.Калявин, Л.М. Рыбаков. СПб.: Элмор, 2009. 331 с.9Концепция обеспечения надёжности в электроэнергетике. /Воропай Н. И., Ковалёв Г. Ф., Кучеров Ю. Н. и др. М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. 212 с.
2. GorV., PovhD., YichuanLu, LerchE., RetzmannD., SadekK., ThummG.. SCCL-A new type of FACTS based short-circuit current limiter for application in high voltage systems. CIGREsession 2004, paper B4-209.
3. Абдуллазянов Э.Ю., Леонов А.В. Оценка воздействия на потребителей провалов напряжения с учетом переходных процессов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №5-6. С. 65–70.
4. Абдуллазянов Э.Ю., Забелкин Б.А., Федотов А.И. Электроснабжение предприятий с непрерывным технологическим циклом производства / Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». Томск, 2008. С. 123–125.
5. Федотов А.И., Кузнецов А.В. Экспериментальные исследования резистивного заземления нейтрали в системе электроснабжения станций нефтепродуктоперекачки // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. №7-8. С. 75–81.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink. 1-е издание. 2007. 288 с. ISBN 978-5-388-00020-0.

Поступила в редакцию

01 апреля 2016 г.

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: fed.ai@mail.ru.

Бахтеев Камиль Равилович – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: kam1609@mail.ru.

Леонов Александр Владимирович – инженер АО «АК «Уралтранснефтепродукт», г. Уфа. E-mail: 67leonov@mail.ru.