Буслов Виктор Владимирович
магистрант
Чемборисова Наиля Шавкатовна
д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
г. Москва

ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ НА РЕЖИМНЫЕ И ОБОБЩЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ СЕТИ

Аннотация: *в работе рассматривается влияние зависимости статических характеристик нагрузки (СХН) при их разной крутизне не только на изменение режимных параметров, но и на изменение обобщенных параметров схемы сети, а также на значения характеристик электросетевого оборудования. Представлены результаты исследования 4 режимов: без учета СХН, с пологими СХН, средней крутизны и с крутыми СХН. Установлено, что степень крутизны СХН оказывает влияние на результаты расчетов режимов работы электрической сети, которые необходимо учитывать для повышения эффективности использования электросетевого оборудования.*

Ключевые слова: *графики нагрузки сети, режим сети, неоднородная электроэнергетическая система, сенсорность узлов, параметры схемы сети.*

Эффективность функционирования электрической сети напрямую зависит от поддержания нормального уровня напряжения в контрольных точках энергосистемы и у потребителя. При этом важной задачей становится ведение режима работы энергосистем путем определения максимальных нагрузок сети в течение месяца, квартала, года. Равномерная, не изменяющаяся во времени нагрузка сети обеспечивает ее неизменный нормальный режим работы, но график учета суточного потребления электроэнергии показывает, что разделение режима на стабильно наибольшие и наименьшие нагрузки невозможно, поскольку является различным для каждого потребителя и может меняться в

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

течение года. Кроме того, каждая подстанция может питать различные виды потребителей: как города (мегаполисы), так и промышленные предприятия, а также электротранспорт. В связи с этим для суточного графика нагрузки характерно значительное изменение его формы, характеристики (заполнения), что обусловлено большой амплитудой максимумов нагрузки, поэтому для исследований необходимо использовать усредненные типичные графики нагрузок, построенные на основе ряда графиков по средним получасовым нагрузкам. Таким образом, каждая форма графика влияет на режимные параметры различных сетей по-разному [1].

В свою очередь, на величину мощности потребителей влияет как режим (порядок) их работы во времени, так и параметры режима – напряжение на зажимах потребителя электроэнергии и частота в электрической сети. Зависимости, показывающие изменение активной и реактивной мощности от частоты и подведенного напряжения при медленных изменениях (менее 1% / сек) этих параметров, называют статическими характеристиками нагрузки (СХН). Изменение режима сети путем его одноцелевой структурной оптимизации при улучшении только одного из параметров режима обязательно приводит к ухудшению других. Например, при минимизации суммарных потерь активной мощности значительно возрастают уровни напряжений в узлах сети. Если не использовать регулирующие устройства, то потребление мощности и энергии может увеличиться из-за роста напряжений в узлах в соответствии со статическими характеристиками нагрузки.

Изменения параметров режима – реакция ЭЭС – вызываются внешними и внутренними возмущениями, постоянно действующими на электроэнергетическую систему. На изменение параметров влияют не только вид, величина возмущения, места его приложения (внешние факторы), но и схема и параметры элементов ЭЭС (внутренние факторы) [2]. Разделение узлов сети на сенсорные, модули напряжений которых сильнее всего изменяются при одних и тех же внешних возмущениях, и жесткие, имеющие противоположные свойства, связано с заметной реакцией модулей напряжения в узлах на изменение уровня нагрузки в

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

разных местах ЭЭС [6]. Особый интерес представляет анализ свойств узлов в интеллектуальной сети, которая может быть достаточно сложной и иметь в своем составе большое количество различных устройств управления, трансформаторов и кольцевых схем [2]. Результаты исследований показывают, что к появлению сенсоров приводит неоднородность ЭЭС, которая во многом определяется схемой ЭЭС и ее параметрами, причем, в ЭЭС можно выделить такие элементы, изменение параметров которых в наибольшей степени влияет на величину реакции ЭЭС на возмущения. С помощью этих параметров появляется возможность быстрее всего изменить свойства ЭЭС [3]. Следовательно, целенаправленному улучшению свойств ЭЭС при ее развитии и учет этих свойств при эксплуатации способствуют информация об элементах схемы, которые служат причиной повышенной чувствительности ЭЭС к внешним возмущениям. Жесткость или сенсорность узлов до расчета установившегося режима оценивается по матрице узловых проводимостей, при вычислении разности между собственной y_{ii} и суммой взаимных проводимостей y_{ij} для каждого i-го узла [5] и выделении её мнимой составляющей ΔB.

Для примера была выбрана неоднородная электроэнергетическая система из 13 узлов с 2 генераторами и 3 источниками реактивной мощности. Все нагрузки и генерации, за исключением балансирующего узла, были переведены в шунты, нагрузки имели резко неоднородные графики мощности. Исследование проводилось в режиме с максимальной нагрузкой в сети, учитывалась различная крутизна СХН (пологие, средние и крутые). Для сравнения был рассчитан режим при нагрузке, не зависящей от напряжения, представлены матрицы узловых проводимостей, на основе которых были составлены списки сенсорности, приведенные в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Списки сенсорности узлов

Пологие СХН		Средние СХН		Крутые СХН		Без СХН	
Номер узла	ΔB	Номер узла	ΔB	Номер узла	ΔB	Номер узла	ΔB
8	−0,0013077	8	−0,001375	8	−0,001433	8	−0,001234

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

6	−0,0004081	6	−0,000450	6	−0,000487	9	−0,000375
9	−0,0003980	9	−0,000419	9	−0,000437	6	−0,000361
12	−0,0003128	12	−0,000332	12	−0,000349	12	−0,000292
13	−0,0002906	13	−0,000305	13	−0,000317	13	−0,000275
3	−0,0002153	3	−0,000215	3	−0,000214	3	−0,000218
10	−0,0000678	10	−0,000076	10	−0,000083	10	−0,000059
11	0,0000494	11	−0,000056	11	−0,000062	11	−0,000042
4	0,0003322	4	0,000333	4	0,000333	4	0,000331
5	0,0003924	5	0,000393	5	0,000393	5	0,000392
1	0,0005557	1	0,000556	1	0,000556	1	0,000556
2	0,0006110	2	0,000609	2	0,000607	2	0,000613
7	0,1770229	7	0,182312	7	0,189295	7	0,175037

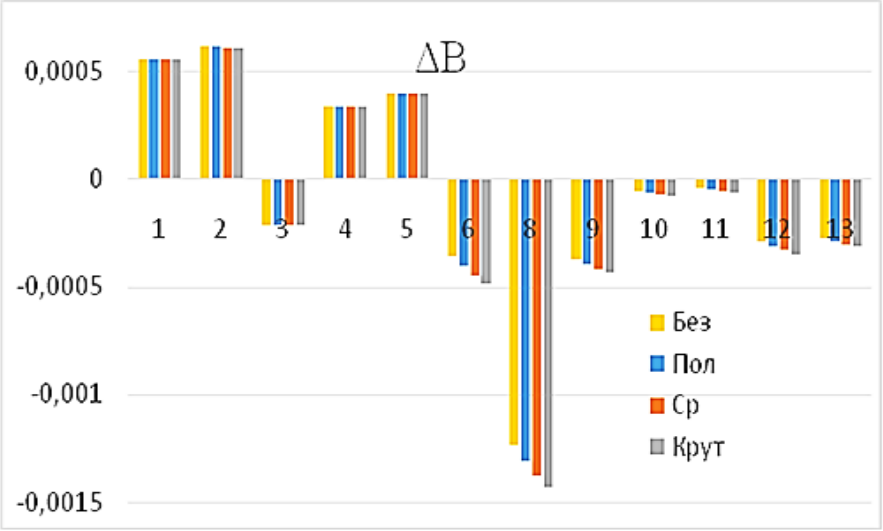

Рис. 1. Мнимая составляющая ΔB узлов при различной степени крутизны СХН

Как видно из представленных в таблице 1 данных, для рассматриваемой сети и установленных уровней мощностей не характерен большой дрейф узлов в списках, за исключением режима с отсутствием зависимости нагрузки от напряжения, в котором узлы 6 и 9 меняются местами. Так как эти узлы являются практически самыми жесткими, то при оптимизации режима, установки оборудования для усиления сети или ограничению токов короткого замыкания без учета СХН эффект мероприятий может быть не максимальным. При расчете режимов были получены значения напряжений в узлах (таблица 2), построен сопоставительный график отклонений напряжения в узлах от номинальных значений для четырех рассматриваемых случаев (рис. 2).

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Таблица 2

Отклонения напряжений в узлах

Номер узла	Без СХН			Пологие СХН			Средние СХН			Крутые СХН		
	V, кВ	ΔV, кВ	δV, %	V, кВ	ΔV, кВ	δV, %	V, кВ	ΔV, кВ	δV, %	V, кВ	ΔV, кВ	δV, %
1	220	0	*0*	220	0	*0*	220	0	*0*	220	0	*0*
2	219,81	− 0,19	*− 0,09*	219,57	− 0,43	*− 0,19*	218,98	− 1,02	*− 0,46*	218,28	− 1,72	*− 0,78*
3	217,92	− 2,08	*−0,94*	217,57	− 2,43	*− 1,11*	216,63	− 3,37	*− 1,53*	215,52	− 4,48	*− 2,04*
4	217,42	− 2,58	*− 1,17*	217,06	− 2,94	*− 1,34*	216,15	− 3,85	*− 1,75*	215,10	− 4,90	*− 2,23*
5	218,22	− 1,78	*− 0,81*	217,95	− 2,05	*− 0,93*	217,33	− 2,67	*− 1,21*	216,63	− 3,37	*− 1,53*
6	112,07	2,07	*1,89*	111,55	1,55	*1,41*	110,45	0,45	*0,41*	109,24	− 0,76	*− 0,69*
7	10,21	− 0,29	*− 2,73*	10,16	− 0,34	*− 3,29*	10,00	− 0,50	*− 4,72*	9,82	− 0,68	*− 6,52*
8	111,24	1,24	*1,12*	110,72	0,72	*0,65*	109,66	− 0,34	*− 0,31*	108,51	− 1,49	*− 1,35*
9	110,93	0,93	*0,85*	110,40	0,40	*0,37*	109,33	− 0,67	*− 0,61*	108,19	− 1,81	*− 1,64*
10	111,28	1,28	*1,16*	110,75	0,75	*0,68*	109,67	− 0,33	*− 0,30*	108,50	− 1,50	*− 1,36*
11	110,87	0,87	*0,79*	110,34	0,34	*0,31*	109,26	− 0,74	*− 0,67*	108,11	− 1,89	*− 1,72*
12	110,74	0,74	*0,67*	110,20	0,20	*0,19*	109,13	− 0,87	*− 0,79*	107,99	− 2,01	*− 1,83*
13	110,50	0,50	*0,46*	109,97	−0,03	*−0,03*	108,91	− 1,09	*− 0,99*	107,79	− 2,21	*− 2,01*

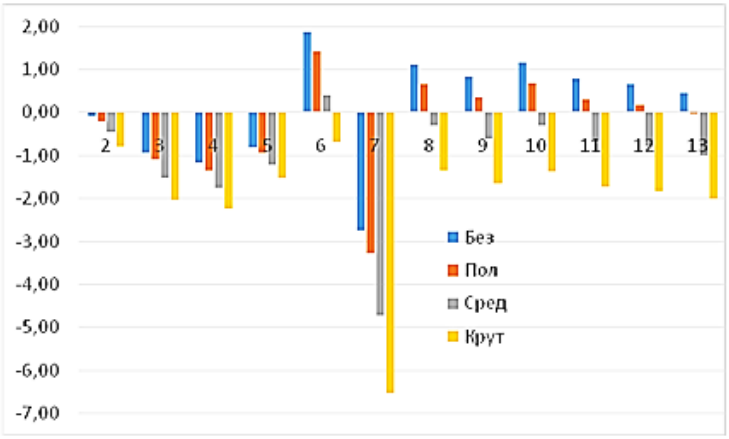

Рис. 2. Относительные отклонения значений напряжений от номинальных значений

Статические характеристики нагрузки также влияют на оптимизацию режима. Для данной схемы самой простой оптимизацией является регулирование степени компенсации реактивной мощности установленными синхронными компенсаторами. Для оценки воздействия были проведены расчеты режимов при различной степени загрузки оборудования (от -100% до +100%) и построен соответствующий график зависимости потерь активной

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

мощности в сети от степени компенсации реактивной мощности для определения наилучших настроек оборудования (рис. 3).

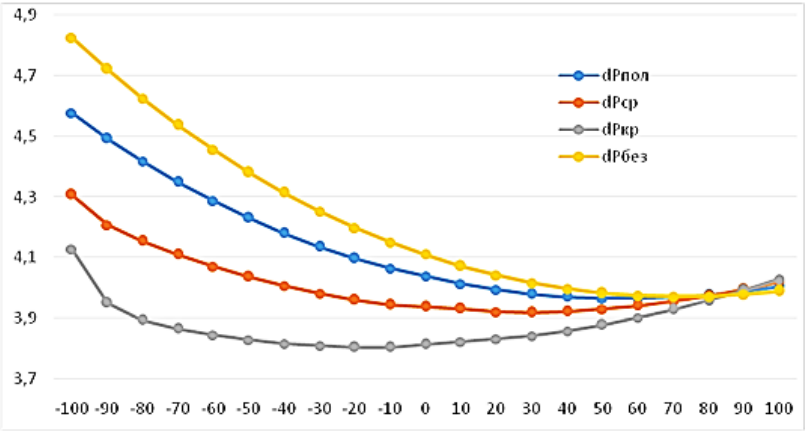

Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности
от степени загрузки источников реактивной мощности

На графике видно, что для различных СХН минимум потерь будет при разных степенях компенсации: для пологих – это 60%, для средних – 30%, для крутых – 10%, а в отсутствии СХН требуется установить мощность на 70%.

Выводы:

– при изменении крутизны СХН дрейф узлов в списках не происходит, но само появление их смещает узлы, находящиеся близко к краевым значениям, что может влиять на эффективность принимаемых мер;

– наибольшие отклонения от номинальных напряжений происходят в узле 7, являющимся наиболее сенсорным;

– при оптимизации режимов выявлено, что мощность имеющихся компенсирующих устройств при различной крутизне СХН для снижения потерь следует изменять. Чем круче характеристика, тем меньше компенсирующие устройства должны генерировать реактивной мощности.

Список литературы

1. Буслов В.В. Оценка влияния графиков нагрузки на режим работы неоднородной сети [Текст] // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016:

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Материалы VII Международной научно-технической конференции (19–23 сентября 2016 г., Казань): В 3 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 98–101.

2. Войтов О.Н. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем [Текст] / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 256 с.

3. Гамм А.З. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах [Текст] / А.З. Гамм, И.И. Голуб. – Иркутск, 1996. – 97 с.

4. Фарафонов В.Е. Использование «жестких» узлов для расстановки компенсирующих устройств [Текст] / В.Е. Фарафонов, Н.Ш. Чемборисова // III Междунар. науч.-практ. конф.: Энергосистема: управление, конкуренция, образование: В 2 т. – Екатеринбург, 2008. – Т. 2. – С. 130–133.

5. Фролов О.В. Формализованная установка устройств управления режимами в сетях мегаполисов [Текст] / О.В. Фролов, Н.Ш. Чемборисова, Н.С. Мулиц // Электричество. – 2012. – №5. – С. 5–9.

6. Чемборисова Н.Ш. Анализ свойств отдельных узлов в интеллектуальной сети [Текст] / Н.Ш. Чемборисова, И.В. Буков // Интеллектуальные энергосистемы: Труды I Международного молодёжного форума: В 2 т. (Томск, 21–25 октября 2013 г.). Т. 1. – Томск, 2013. – С. 16–20.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)