

Система активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях 110–220/6–20 кВ¹

НАСЫРОВ Р.Р., ТУЛЬСКИЙ В.Н., КАРТАШЕВ И.И.

Предлагается система активно-адаптивного регулирования напряжения трансформаторов с регулированием под нагрузкой (РПН), позволяющая по результатам расчетно-измерительных процедур выбрать требуемое положение переключателя РПН. Такой подход к централизованному регулированию напряжения в распределительных сетях позволяет обеспечить требуемый уровень напряжения у наибольшего возможного числа потребителей за счет прогнозирования изменения напряжения. При этом проводится учет остаточного ресурса РПН трансформатора, что не приводит к досрочному его износу. Результаты расчетных экспериментов показали, что применение системы активно-адаптивного управления РПН трансформатора, в сравнении с принципом встречного регулирования, позволяет на порядок увеличить число узлов сети с уровнем напряжения, соответствующим требуемому.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, качество электроэнергии, регулирование напряжения, активно-адаптивная система, регулирование под нагрузкой, математическое моделирование

В распределительных сетях систем электроснабжения городов, как правило, не удается обеспечить нормативные требования по установившемуся отклонению напряжения. В соответствии с паспортными рекомендациями на выводах электроприемников это $\pm 5\%$. Такой вывод подтверждается опытом инструментального контроля качества электрической энергии (КЭ) и проведенными расчетами. Можно выделить несколько причин такого несоответствия:

отсутствие регулирования напряжения в центрах питания (ЦП) и сезонных переключений на трансформаторных подстанциях (ТП) 6–10/04 кВ;

отказ от использования РПН, обусловленный ссылкой на плохое техническое состояние этих устройств вплоть до угрозы выхода из строя трансформаторов ЦП²;

неоднородность нагрузки ЦП, т.е. максимумы отдельных потребителей не совпадают во времени

¹ Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы (соглашение от 22.08.2014 № 14 574 21 0095).

² Информационное письмо департамента электрических сетей РАО «ЕЭС» России» (1995 г.).

при регулировании напряжения на ЦП по её суммарному току.

Суточное регулирование напряжения в распределительных сетях 6–20 кВ для обеспечения КЭ проводится в основном связкой автоматического регулятора напряжения (АРН) и РПН силовых трансформаторов ЦП. Устройство АРН «принимает решение» об изменении номера рабочего ответвления РПН по результатам контроля напряжения на шинах 6–10 кВ ЦП и тока нагрузки отходящего присоединения или суммарного тока трансформатора ЦП. Кроме того, АРН контролирует корректность и условия работы РПН, таких как верхнее/нижнее положение переключателя РПН (в крайнем положении – команда «поднять/снизить» положение переключателя запрещена), превышение температуры масла в баке – регулирование запрещено, время цикла переключения превышено (отказ привода РПН – снять питание с привода) и др.

В АРН предусмотрены уставки, имеющие непосредственное отношение к ведению регулирования напряжения. К ним относятся [1]: напряжение стабилизации U_0 , ширина зоны нечувствительности ϵ (%), коэффициент токовой компенсации (коэффициент статизма) k – отношение напряжения к току трансформатора (В/А), выдержка времени на переключение при выходе напряжения из зоны нечувствительности t (мин). Выдержка времени обеспечивает задержку на переключение при кратковременных изменениях напряжения, что способствует сохранению коммутационного ресурса переключателя.

Закон регулирования АРН в ЦП описывается зависимостью:

$$U_{\text{ЦП}} = U_0 + kI \pm (\epsilon/U_{\text{НОМ}} 100), \quad (1)$$

где I – ток отходящего присоединения или суммарный ток силового трансформатора ЦП; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжения сети, в которой проводится регулирование напряжения.

Графически закон регулирования АРН приведен на рис. 1, где $I_{\text{НБ}}$ и $I_{\text{НМ}}$ – режимы наибольшей

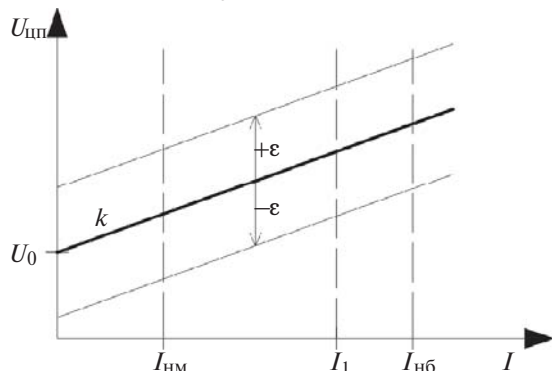


Рис. 1. Закон регулирования напряжения трансформатора в ЦП

и наименьшей нагрузки контролируемого присоединения.

Если напряжение (1) при какой-то нагрузке трансформатора центра питания или отходящего присоединения, соответствующей полному току I_1 , выходит за верхний или нижний предел более чем на t мин, АРН формирует сигнал на РПН в сторону соответственно снижения или увеличения напряжения до момента введения напряжения в зону нечувствительности при данной нагрузке. Нетрудно заметить, что при статизме $k=0$ напряжение на шинах стабилизируется в диапазоне $U \pm (\epsilon/U_{\text{НОМ}} 100)$ и не зависит от тока нагрузки.

Рассмотренный способ регулирования напряжения [1] не учитывает неоднородность нагрузки и изменение напряжений в сети 6–20 кВ, а учитывает их значения в одной единственной точке, в которой для контроля регулируемых параметров режима установлены трансформаторы тока и напряжения. Как правило, это шины ЦП. Причем, с введением правил [2] уровень неоднородности нагрузки в сети возрос.

В статье предлагается способ активно-адаптивного регулирования в ЦП. Очевидно, что при современном уровне развития приборостроения и существующих проводных и беспроводных каналов связи создание системы регулирования напряжения, которая контролировала бы напряжения не только на шинах ЦП, но и в других точках распределительной сети вблизи электроприемников, не представляет сложности с технической точки зрения. Такой способ позволит учитывать неоднородность нагрузки сети 6–20 кВ.

Предлагаемый способ реализуется системой активно-адаптивного регулирования напряжения в ЦП сети 6–20 кВ и предусматривает контроль, анализ и прогнозирование хода изменения напряжения в множестве наиболее характерных рассредоточенных точках (ТК) сети. В соответствии с опытом испытаний в распределительных электрических сетях в качестве ТК допустимо выбирать шины 0,4 кВ ТП. При этом для обеспечения требуемого напряжения по [3] необходимо учитывать потери напряжения в сети 380 В, которые могут быть определены прямыми измерениями или расчетно-измерительным методом. Исходя из потерь в сети 380 В определяются допустимые границы отклонения напряжения в ТК.

Система активно-адаптивного регулирования напряжения выбирает желаемое ответвление РПН, используя результаты измерений в каждой ТК. Эти результаты формируют базу суточных и годовых данных, которые обрабатываются так, чтобы определить взаимокорреляционную функцию с учетом всех измерений и выработать прогноз на очередное переключение РПН.

Измерения напряжения в ТК. В каждой ТК проводится измерение мгновенных значений фазных напряжений. По этим значениям определяются основная гармоника и прямая последовательность контролируемого напряжения [3]. Полученные значения основной частоты прямой последовательности усредняются на одноминутных интервалах и архивируются.

Определение прогнозных значений отклонений напряжения в ТК. Прогнозирование хода отклонения напряжения в ТК проводится с использованием метода описательной математической статистики по функции взаимокорреляции. Максимум взаимокорреляционной функции $rdU_y - r_{max}$ соответствует периоду времени с графиком отклонения напряжения dU_y , подобным текущему графику отклонения напряжения в ТК. Это позволяет предположить, что следующие (прогнозируемые) n минутных значений напряжения будут такие же, как предыдущие измеренные в ТК n минутных значений ряда dU_y .

Выбор общего решения об изменении номера ответвления РПН на центре питания. Зная прогноз хода изменения отклонения напряжения U_i , верхнюю U_B и нижнюю U_H границы допустимого отклонения напряжения в ТК, можно определить допустимые номера ответвлений РПН на период прогноза $Z_{доп}$. Для этого для каждой ТК во всем возможном диапазоне изменения номеров ответвлений РПН трансформатора $[Z_{min}, Z_{max}]$ (с учетом ступени изменения напряжения dD) проверяется условие выхода каждого минутного значения U_i за пределы U_B и U_H . Если для какого-то положения переключающего устройства РПН минутные значения выше U_B , то счетчик регистрирует число таких превышений, определяя в данной ТК относительное время выхода напряжения за верхнюю границу допустимого уровня напряжения T_{1+} . Аналогично работает счетчик относительного времени выхода напряжения за нижнюю границу допустимого уровня напряжения T_{1-} в данной ТК, но уже относительно U_H . Те значения Z , для которых $(T_{1+} + T_{1-}) / n \leq 0,05$, где n – число измеренных значений U_i за время между следующими друг за другом переключений ответвлений РПН, признаются удовлетворительными и вносятся в вектор столбец $Z_{доп}$. Это условие соответствует требованиям обеспечения КЭ по отклонениям напряжения с принятым ответвлением РПН Z . При этом в целом за сутки условие $(T_{1+} + T_{1-}) / n \leq 0,05$ остается выполнимым для всех выбранных ответвлений. Однако при резкопеременном характере графика нагрузки, когда напряжение варьируется в широком диапазоне, таких Z может не оказаться. Тогда в вектор $Z_{доп}$ заносятся те Z , при которых $(T_{1+} + T_{1-}) / n$ минимально:

$$\begin{aligned} & \text{for } Z = Z_{min} \dots Z_{max} \text{ do: } U_i + Z dD' \\ & \left. \begin{aligned} & > U_y \vdash T_{1+} = T_{1+} + 1 \\ & < U_n \vdash T_{1-} = T_{1-} + 1 \end{aligned} \right\} \vdash \\ & \vdash \text{if } \begin{cases} (T_{1+} + T_{1-}) \leq 0,05 \vdash Z_{доп} = Z; \\ (T_{1+} + T_{1-}) < 5 \vdash Z_{доп} = Z[\min(T_{1+} + T_{1-})]. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

В итоге для каждой ТК формируется вектор-столбец допустимых изменений номеров ответвлений РПН $Z_{доп}$ на период прогноза n .

В центре питания исходя из полученных для каждой ТК значений перед $Z_{доп}(a)$ необходимо выбрать общее решение о принимаемом номере ответвления РПН. Это решение формируется как общее решение для всех ТК с использованием математического метода обработки статистической информации – построением функции плотности распределения полученных значений $Z_{доп}(a)$. Для этого рассматривается каждая ТК и во всем диапазоне изменения номера ответвления $[Z_{min}, Z_{max}]$ подсчитывается число $Z_{доп}$, попадающих на то или иное ответвление Z . Если такие попадания есть, то $Z_{доп}[Z]$ подсчитывает их число. То ответвление Z , для которого $Z_{доп}$ максимально (соответствующее математическому ожиданию плотности распределения) и является общим решением выбора требуемого номера ответвления РПН как удовлетворяющее требованиям наибольшего числа ТК (3):

$$\begin{aligned} & \text{for each } (a) \\ & \text{for } (Z = Z_{min} \dots Z_{max}) \\ & \text{if } Z_{доп}(a) = Z \\ & \text{then } Z_{доп}[Z] = Z_{доп}[Z] + 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Графически определение $Z_{доп}[Z]$ представлено на рис. 2: каждая ТК (ТК1, ТК2, ТК3, ..., ТКМ) задает свой допустимый диапазон изменения номера ответвления РПН:

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} \text{ТК1} \\ \text{ТК2} \\ \text{ТК3} \\ \dots \\ \text{ТКМ} \end{matrix} \begin{matrix} \text{[} \\ \text{[} \\ \text{[} \\ \vdots \\ \text{[} \\ \text{[} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \\ \vdots \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \begin{matrix} \text{]} \\ \text{]} \\ \text{]} \\ \vdots \\ \text{]} \\ \text{]} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \\ \vdots \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \\ \vdots \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \\ \vdots \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \\ \vdots \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \\ \vdots \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Из этих значений очевидно, что ответвление $[-2]$ удовлетворяет все ТК. Это значение и принимается в качестве общего решения об изменении номера ответвления РПН.

Конечно, возможна ситуация, когда общее решение не удовлетворяет одну и более ТК, но это решение призвано обеспечивать требуемый уровень напряжения у наибольшего *возможного* числа ТК, а те ТК, где наблюдается систематическое «выпадение» из общего решения, нуждаются в средствах местного регулирования напряжения.

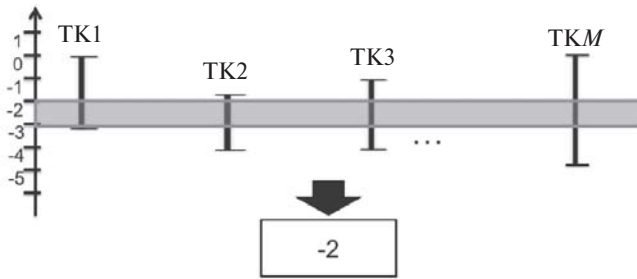


Рис. 2. Выбор общего решения об изменении номера ответвления РПН на центре питания

Запросы ТК из ЦП для определения оптимального изменения номера ответвления РПН должны проводиться по определенному закону. Этот закон должен учитывать ресурс РПН трансформатора. Если запросы будут происходить очень часто, то РПН может выработать свой ресурс быстрее чем за 25 лет. Кроме того, необходимо учитывать характер изменения нагрузки, что отразится и на регулировании напряжения в течение суток. Для учета этих факторов в системе активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных сетях разработан формирователь частоты опроса ТК.

Формирователь частоты запроса ТК. Формирователь частоты опроса ТК определяет значение $t_{фч}$ – время выдержки до следующего запроса, исходя из подсчета числа переключений S и времени t работы РПН в минутах за сутки:

$$t_{фч} = \frac{1440 - t}{24f - S}, \quad (5)$$

где $f = S_{\max} / 219000$ – максимальная частота переключений РПН за один час исходя из механического ресурса; 219000 – число часов за нормативный срок службы РПН (согласно [4] – это 25 лет); S_{\max} – максимальное (остаточное) число операций РПН.

Если РПН вновь введен или был проведен его капитальный ремонт, то S_{\max} численно равно механическому ресурсу по переключениям РПН.

Апробация предлагаемой системы регулирования напряжения. Для тестирования предлагаемой активно-адаптивной системы регулирования напряжения была разработана виртуальная модель распределительной сети. Эта модель сети разработана по данным статистической информации по пятидесяти ЦП и учитывает:

число и номинальные мощности трансформаторов ТП 10/0,4 кВ;

число и длину головных присоединений (фидеров) ЦП;

то же присоединений (фидеров) за исключением головных.

Статистическая информация представлялась в виде гистограмм плотности распределения иссле-

дуемых данных. В соответствии с полученными гистограммами были определены наиболее часто встречающиеся значения мощности трансформаторов ТП 10/0,4 кВ и протяженности линий 6–20 кВ.

Модель распределительной сети содержит:

45 ТП 10/0,38 кВ с установленной мощностью трансформаторов в диапазоне от 160 до 1250 кВА;

6 головных присоединений;

30 линий электропередачи.

Нагрузка каждой ТП 10/0,4 кВ представлена двухнедельным графиком активной и реактивной мощности с осреднением на минутном интервале.

Для этой сети с заданными графиками мощности был получен закон регулирования напряжения в центре питания, реализующий принцип встречного регулирования по (1):

$$U_* = 7,18 + 0,095I \pm 0,02.$$

Изменение положения переключателя РПН трансформатора при встречном (рис. 1) регулировании напряжения показано на рис. 3,а.

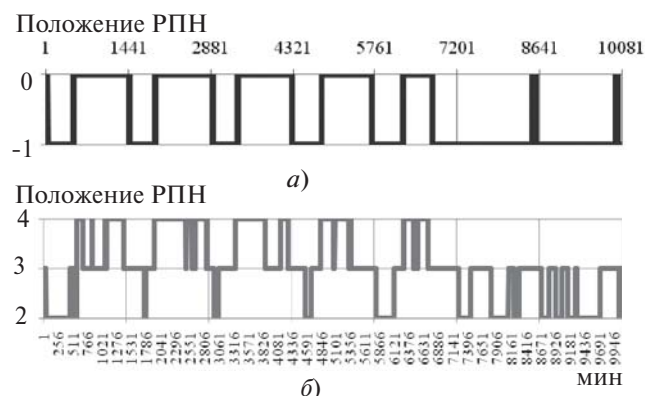


Рис. 3. Изменение положения переключателя РПН трансформатора ЦП: а – при встречном регулировании напряжения; б – при активно-адаптивном регулировании

Тестирование системы активно-адаптивного регулирования напряжения проводилось для реальной схемы распределительной сети. Результаты тестирования представлены в таблице. Изменение положения РПН трансформатора при реализации системы активно-адаптивного регулирования напряжения показано на рис. 3,б.

Таблица

День недели	Число ТП с неудовлетворительным КЭ/% общего числа ТП	
	при встречном регулировании	при активно-адаптивном регулировании
Тестовая схема сети (45 ТП)		
Понедельник	34/76	10/22
Вторник	34/76	0/0

Среда	33/73	0/0
Четверг	26/58	0/0
Пятница	36/80	1/2
Суббота	36/80	1/2
Воскресенье	36/80	3/7
Реальная схема сети (44 ТП)		
Понедельник	30/68	16/36
Вторник	28/64	1/2
Среда	26/59	1/2
Четверг	44/100	2/5
Пятница	37/84	0/0
Суббота	28/64	4/9
Воскресенье	29/66	2/5

Результаты тестирования системы активно-адаптивного регулирования напряжения, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что и для тестовой, и для реальной модели сети в понедельник регулирование напряжения намного хуже, чем в остальные дни. Причина этого – втягивание системы и в связи с этим недостаточный объем архива для формирования прогноза изменения напряжения в ТК в начале недели. В целом система активно-адаптивного регулирования напряжения существенно повысила число ТП с удовлетворительным качеством электроэнергии в сравнении с принципом встречного регулирования.

Выводы. 1. В распределительных сетях следует отдать предпочтение системе активно-адаптивного регулирования напряжения в сопоставлении с принципом встречного регулирования, как системе, обеспечивающей допустимые отклонения напряжения в существенно большем числе точек.

2. Система активно-адаптивного регулирования напряжения требует информационного обслуживания во всех выбранных точках с использованием методов прогнозирования изменений отклонения напряжения на базе методов описательной матема-

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 12, pp. 13–18.

Smart Voltage Control System for Distribution Grids 110–220/6–20 kV

R.R. NASYROV, V.N. TUL'SKII, I.I. KARTASHEV

The article is devoted to development of smart OLTC system for transformers based on actual voltage levels in the nodes of distribution grid. This approach to the centralized voltage control in distribution networks makes it possible to ensure the required level of voltage in the most possible number of consumers due to predict of voltage change. This also includes an account of the residual life of the transformer OLTC

тической статистики и анализа функции взаимокорреляции.

3. Предлагаемая система активно-адаптивного регулирования напряжения учитывает фактический остаточный ресурс РПН силового трансформатора, обеспечивая рациональное его использование в течение всего срока эксплуатации трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инструкция** по регулированию напряжения трансформаторов РПН 35–110 кВ. Министерство энергетики и электрификации СССР. – М.: Союзтехэнерго, 1978, 50 с.

2. **Постановление** Правительства от 27 декабря 2004 г. No. 861 «Об утверждении правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям».

3. **ГОСТ 32144–2014.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт, 2014, 16 с.

4. **ГОСТ 11677–85.** Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Госстандарт, 1984, 48 с.

[7.10.14]

Авторы: Насыров Ринат Ришатович окончил Московский энергетический институт (Технический университет) – МЭИ (ТУ) в 2010 г. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях». Научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем Научно-исследовательского университета (НИУ) «МЭИ».

Тулский Владимир Николаевич окончил МЭИ в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения». Доцент кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ».

Карташев Илья Ильич окончил МЭИ в 1962 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Статистические источники реактивной мощности». Ведущий научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ».

that does not lead to its premature exhaustion. The experiments showed that the use of smart OLTC system in comparison with the principle of counter-regulation allows by times reduce the not within the required voltage level nodes of the network

Key words: *power distribution networks, power quality, voltage control, active-adaptive system, no-load voltage control, mathematical modeling*

REFERENCES

1. **Instruktsiya po regulirovaniyu napryazheniya transformatorov RPN 35–110 kV** (An Instruction for Voltage Control by Means of OLTCs of 35-110 kV Transformers). USSR Ministry of Energy Soyuztekhnenergo, 1978, 50 p.

2. **Postanovleniye Pravitel'stva RF No. 861 of 27.12.2004.** Resolution of the Government of the Russian Federation No. 861 from 27.12.2004.

3. **GOST 32144–2014.** *Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* (State Standard 32144-2014: Electric Energy Quality Standards in General-Purpose Electric Power Supply Systems). Moscow. Publ. Gosstandart, 2014, 16 p.

4. **GOST 11677–85.** *Transformatory silovye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* (Power Transformers. General specifications). Moscow. Publ. Gosstandart, 1984, 48 p.

Authors: Nasyrov Rinat Rishatovich (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci., Research Assistant of the Department at the Scientific and Research University «Moscow Power Engineering Institute» (SRU «MPEI»).

Tulsky Vladimir Nikolaevich (Moscow, Russia) – Cand. Techn.Sci. Deputy Head of Department at the SRU «MPEI».

Kartashev Ilya Ilyich (Moscow, Russia) – Cand. Techn.Sci. Deputy Head of Department at the SRU «MPEI».