

УДК 621.316.721.001

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ТИРИСТОРНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ РПН

Инж. ГУРЕВИЧ В. И., канд. техн. наук, доц. САВЧЕНКО П. И.

Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства

В связи с многочисленными недостатками механических устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) в последнее время появилось много разработок бесконтактных устройств РПН, выполненных на тиристорах. Опыта их эксплуатации в распределительных сетях еще нет, однако тиристорные РПН уже широко применяются для стабилизации входного напряжения технологических установок (электротехническое оборудование, электролизное производство и т. п.). Поэтому при разработке тиристорных РПН для распределительных сетей часто переносят общие принципы построения и методы регулирования напряжения с устройств РПН технологических установок.

Основной метод, не имеющий принципиальных трудностей на высоком напряжении и допускающий работу в распределительных сетях, — амплитудно-фазовый, основанный на изменении момента переключения один раз в полупериод нижнего и верхнего выводов регулировочной обмотки трансформатора. По такому принципу построены тиристорные РПН, предназначенные для применения в сельских и городских сетях. Однако мощности (63—1 000 кВ·А) и рабочее напряжение (10 кВ) этих устройств уже не всегда удовлетворяют современным требованиям. В настоящее время обоснована целесообразность применения тиристорных РПН на стороне 35 кВ силовых трансформаторов мощностью до 6 300 кВ·А, в связи с чем представляет интерес анализ методов регулирования напряжения таким мощным РПН.

Для оценки и сравнения методов регулирования напряжения используется метод приведенных затрат, разработанный Н. А. Мельниковым. Применение такого специфического регулятора напряжения, как тиристорный, требует учета нового показателя — ущерба от несинусоидаль-

ности. В настоящее время почти 40 % всей производимой в стране электроэнергии преобразовывается различными вентильными устройствами, чем обуславливается значительный экономический ущерб от ухудшения качества электроэнергии в электрических сетях. Поэтому необходимо обязательно учитывать влияние вентильных преобразовательных устройств на качество электроэнергии при проведении технико-экономических сопоставлений.

Несинусоидальность должна характеризоваться различным образом в зависимости от конкретной задачи. Рекомендуемая ГОСТом 13109—67 характеристика (действующее значение суммы высших гармонических) — недостаточно информативная для анализа и принятия решений. Кроме того, в ряде случаев ущерб достигает значительной величины даже при соблюдении показателей качества электроэнергии в пределах ГОСТа 13109—67 [1]. Используя критерий оптимизации показателей качества электроэнергии в виде приведенных затрат, имеем

$$Z_1 = E_n K_1 + I_n + C_{\Delta} A_1 + U, \quad (1)$$

где K_1 — капитальные затраты на плавнорегулируемый РПН;

I_n — ежегодные издержки производства;

ΔA_1 — потери энергии в сети, обусловленные несинусоидальностью;

E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

C — стоимость 1 кВт·ч потерь.

С повышением качества электроэнергии капитальные затраты увеличиваются, а ущерб уменьшается (ликвидируется):

$$Z_2 = E_n (K_1 + \Delta K) + I_n, \quad (2)$$

где ΔK — дополнительные капитальные затраты, связанные с устранением несинусоидальности.

Очевидно, условие целесообразности перехода от плавного регулирования к дискретному (ступенчатому, без искажения формы напряжения) может быть представлено в виде:

$$Z_1 \geq Z_2. \quad (3)$$

Ущерб, обусловленный дополнительными потерями мощности и ускоренным старением изоляции при использовании плавнорегулируемого РПН, определяется как сумма отдельных составляющих

$$U_{\Sigma} = U_{т.с} + U_{т.п} + U_{дв} + U_{каб} + U_{б.к}, \quad (4)$$

где $U_{т.с}$, $U_{т.п}$, $U_{дв}$, $U_{каб}$, $U_{б.к}$ — ущербы соответственно для трансформаторов связи с энергосистемой, потребительских трансформаторов, двигателей, кабелей, батарей конденсаторов.

Каждая из этих составляющих в свою очередь может быть представлена в виде

$$U_i = K_c \Lambda, \quad (5)$$

где $\Lambda = \sum_{n=2}^{13} \frac{U_n^2}{n V n}$ — гармонический коэффициент ущерба [2];

K_c — коэффициент стоимости соответствующего вида электрооборудования.

Для определения Λ необходимо разложить кривую напряжения при плавном регулировании (рис. 1) в ряд Фурье. Разложение в соответствии с [3] дает возможность определить амплитуду первой гармоники:

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\left\{ \left[\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] U_{m2} - \left(\frac{\sin 2\alpha}{2} - \alpha \right) U_{m1} \right\}^2 + (U_{m2} - U_{m1})^2 \sin^4 \alpha} \quad (6)$$

и амплитуду n -й гармоники в зависимости от угла регулирования α :

$$A_n = \frac{2(U_{m2} - U_{m1})}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{(n \sin \alpha - \sin n \alpha)^2 + (n \cos \alpha - \cos n \alpha)^2}}{n^2 - 1}, \quad (7)$$

где U_{m2} и U_{m1} — соответственно напряжения верхней и нижней ступеней регулировочной обмотки;

n — номер гармоники.

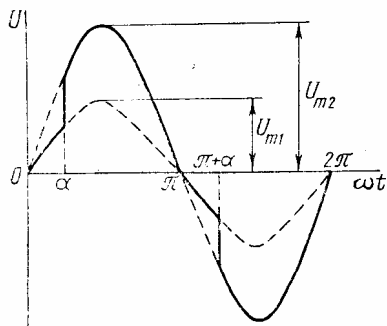


Рис. 1. Форма напряжения на выходе тиристорного РПН при плавном регулировании угла отпирания тиристоров

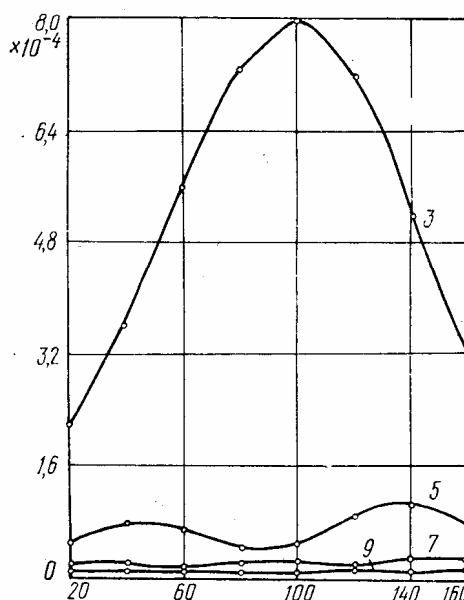


Рис. 2. Зависимость гармонического коэффициента ущерба от угла регулирования (для $\Delta U = \pm 10\%$)

Расчет гармонического коэффициента ущерба Λ с учетом (6) и (7) выполнен на ЦВМ ЕС-ОС по программе на языке Фортран для ряда фиксированных значений переменных:

$\alpha = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160^\circ$;

$n = 3, 5, 7, 9, 11, 13$;

$U_{m1} = 33, 25, 31,5, 29,75, 28,0$ кВ;

$U_{m2} = 36,75; 38,5; 40,25; 42,0$ кВ.

В качестве примера на рис. 2 приведены графические зависимости $\Lambda = f(\alpha)$ для $\Delta U = \pm 10\%$.

На основе полученных результатов может быть рассчитан ущерб от применения плавнорегулируемых РПН для любого конкретного случая при установке РПН на стороне 35 кВ. При этом следует учитывать, что для точного определения ущерба необходим учет активных сопротивлений и емкостных проводимостей элементов систем электроснабжения, распределенности параметров воздушных линий, влияния вытеснения тока в проводниках на активные и индуктивные сопротивления и т. п.

При установке большого количества тиристорных РПН во многих узлах разветвленных воздушных сетей решение данной задачи возможно лишь при использовании моделей электрических сетей и ЦВМ с применением специальных программ, разработанных в МЭИ.

Применение тиристорных РПН наиболее целесообразно и экономически оправданно в первую очередь в сетях с большими отклонениями напряжения и высокой нестабильностью последних, т. е. в сельских сетях на трансформаторах, от которых питаются крупные животноводческие комплексы, птицефабрики, тепличные комбинаты. Такие предприятия являются концентрированными нагрузками и имеют на территории короткие кабельные сети, учет сопротивлений и частотных характеристик которых существенно не уточняет амплитуды отдельных гармоник, но серьезно затрудняет расчет, поэтому целесообразно рассматривать данную систему как совокупность электроприемников, подключенных к общему источнику гармоник.

С учетом этого допущения приведен пример расчета ущерба (по средним значениям гармонического коэффициента ущерба) от применения плавнорегулируемого РПН на стороне 35 кВ силового трансформатора типа ТМН-6300/35, от которого питается потребитель, имеющий 6 трансформаторов типа ТМ-1000/10 и 1 000 асинхронных двигателей типов Д100Л6П и АО2-41-2.

Необходимые для расчета коэффициенты стоимости отдельных видов электрооборудования определяются в соответствии с известной методикой [4]:

для трансформаторов связи с энергосистемой ($U_n = 35/10$ кВ)

$$K_c = N (695 T^{T.c} \Delta P_{m.n}^{T.c} K_\beta + 10 K^{T.c}); \quad (8)$$

для потребительских трансформаторов (10/0,4 кВ, 1 000 кВ·А)

$$K_c = N (610 T^{T.n} \Delta P_{m.n}^{T.n} K_\beta + 1,2 K^{T.n}); \quad (9)$$

для асинхронных электродвигателей ($P_n \leq 10$ кВт)

$$K_c = N (490 T^{a.d} \Delta P_{m.n}^{a.d} K_\beta + 15 K^{a.d}), \quad (10)$$

где N — количество единиц данного вида электрооборудования;

T^i — число тысяч часов работы i -го вида электрооборудования;

$\Delta P_{m.n}^i$ — номинальные потери активной мощности в токоведущих частях электрооборудования;

$K_\beta = \beta/\beta'$ — коэффициент пересчета стоимости потерь электроэнергии;

β — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии (2,5 коп);

β' — расчетная стоимость (1 коп).

K^i — капитальные затраты на соответствующие виды электрооборудования.

Принимая во внимание, что тиристорный РПН такой мощности должен быть установлен на первичной стороне трансформатора, в расчете гармонического коэффициента ущерба третья гармоника учитывалась только для последнего.

При выборе способа регулирования напряжения тиристорным РПН следует учитывать, что срок службы его может составлять 10—20 лет, и в течение всего этого времени в сети будет несинусоидальное напря-

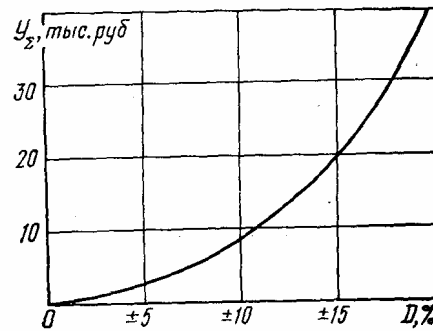


Рис. 3. Зависимость ущерба в узле нагрузки от диапазона регулирования напряжения

жение. Поэтому целесообразно в технико-экономических расчетах по оценке эффективности вариантов учитывать суммарный ущерб от применения РПН конкретного типа за весь его срок службы.

Результаты расчета суммарного ущерба для принятого в качестве примера узла нагрузки (в зависимости от диапазона регулирования) (рис. 3) показывают, что ущерб может достигать значительных величин и оказывается соизмеримым со стоимостью самого РПН. Применение же фильтров высших гармонических пока невозможно, в связи с отсутствием серийных образцов требуемой мощности. Если допустить возможность осуществления плавнорегулируемых РПН с обязательным использованием (в будущем — после серийного освоения) фильтров, то дополнительные капитальные затраты в (2) увеличатся настолько, что их применение может стать, в соответствии с (3), нецелесообразным.

В ы в о д

Применение тиристорных РПН, установленных на силовых трансформаторах, связано с опасностью возникновения значительного народнохозяйственного ущерба, который должен учитываться при технико-экономическом обосновании регулирования напряжения, а также при выборе способов регулирования (плавного или дискретного) и целесообразных областей их применения (с учетом класса напряжения, мощности и характера нагрузки).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Веников В. А., Либкинд М. С., Константинов Б. А. Народнохозяйственное значение повышения качества электроэнергии.— *Электричество*, 1974, № 11, с. 1—4.

2. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях.— М.: Энергия, 1977.—128 с.

3. Некоторые особенности регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов с помощью тиристорных устройств РПН / В. С. Шлентов, Р. Н. Урманов, А. И. Уткин и др.— В кн.: Трансформаторы преобразовательных агрегатов, ч. II. 1973. Вып. 35, с. 31—37.

4. Жежеленко И. В., Слепов Ю. В. Методические указания по определению экономического ущерба, обусловленного несимметрией и несинусоидальностью напряжений в системах электроснабжения промпредприятий.— Жданов: Ждановский МИ, 1976.—25 с.