

## АЛГОРИТМ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ

Омельчук А.О., к.т.н., доцент, Кравчук М.Ю., Малий М.Ю., студенти  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

**Вступ.** Постачальник електроенергії за регульованим тарифом зобов'язаний забезпечувати постачання електричної енергії, якісні характеристики якої, зокрема відхилення напруги  $\delta U$ , відповідають параметрам, визначеним державними стандартами [1, 2] та зазначені в договорі. Нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги  $\delta U$  на вводах споживачів електроенергії повинні дорівнювати, відповідно,  $\pm 5\%$  і  $\pm 10\%$  від номінальної напруги електричної мережі.

Відхилення напруги створює значний вплив на роботу електродвигунів: у випадку зниження напруги зменшується реактивна потужність намагнічування, при тій же споживаній потужності збільшується струм двигуна, що викликає перегрів ізоляції і скорочення його терміну служби.

При значному зниженні напруги на затискачах асинхронного двигуна можливе його "перекидання" через зменшення обертового моменту і частоти обертання ротора - це погіршує і умови пуску двигуна.

Підвищення напруги на виводах двигуна призводить до збільшення споживаної ним реактивної потужності, яку необхідно компенсувати. Вентильні перетворювачі за звичай мають систему автоматичного регулювання постійного струму шляхом фазового управління. Кут регулювання автоматично змінюється прямопропорційно зміні напруги живлячої мережі. Підвищення напруги на 1% призводить до збільшення споживання реактивної потужності перетворювачем на 10-15%, що призводить до погіршення коефіцієнта потужності

Електротермічне обладнання, електролізні, зварювальні установки також чутливі до відхилень напруги, що призводять до збільшення виробничого процесу в часі, а інколи і до браку продукції. При підвищенні напруги понад номінальної відбувається перевитрата електроенергії у порівнянні з рівнем її споживання в номінальному режимі роботи електрообладнання.

**Мета роботи.** Розробка алгоритму регулювання напруги на трансформаторних підстанціях розподільчої мережі для забезпечення нормованого відхилення напруги у споживачів в різних режимах навантаження мережі.

**Матеріали дослідження.** Розрахунки по визначенню режиму роботи РПН для розподільчої мережі (рис. 1) та визначенню допустимої втрати напруги в лініях електропередачі 10 і 0,38 кВ виконуються для двох різновіддалених споживчих ТП-10/0,4кВ - найближчої (ТП в точці 2) і віддаленої (ТП в точці 6) та для двох режимів навантаження - максимального (100%) і мінімального (25%).

Визначаючим для розрахунку допустимих витрат напруги є допустиме відхилення напруги у споживачів, тобто в лініях можна втратити таку величину напруги, при котрій фактичне відхилення напруги у споживачів не виходить за межі допустимого ( $\pm 5\%$ ). Розрахунок наведено в табл. 1 [3].

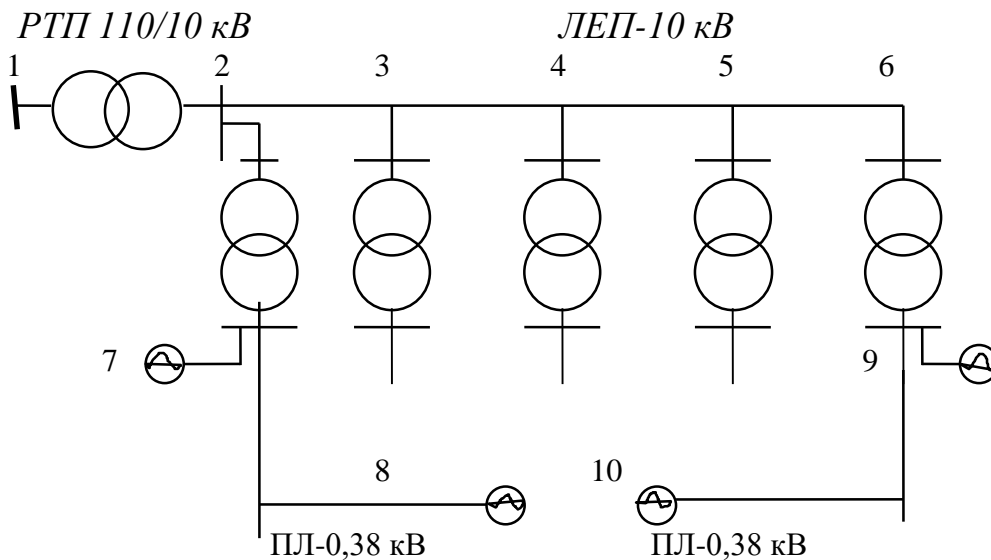


Рисунок 1 – Пояснювальна схема до оптимізації рівнів напруги в розподільній мережі.

Вихідною умовою для розрахунку  $\Delta U_{\text{доп}}$  є відхилення напруги в будь-якій точці мережі. В даному прикладі - це шини 110 РТП (точка 1). При розрахунку  $\Delta U_{\text{доп}}$  одночасно здійснюється вибір регульованих надбавок у трансформаторів.

На кожній споживчій ТП розглядається два різновіддалених споживачі. В режимі *максимальних* навантажень (100%) розглядається *віддалений* споживач (точки 8,10) на зниження напруги. Якщо у цього споживача, підключеного до шин ТП через лінію 0,38кВ, зниження напруги при максимальному навантаженні (коли втрати напруги у всіх елементах мережі максимальні) не перевищує, або рівне допустимому (-5%), то у ближчих до ТП споживачів, або при навантаженнях, менших від максимального, більшого зниження напруги не буде.

Аналогічно, в режимі мінімального навантажень (25%) розглядається найближчий до ТП споживач (точки 7,9) на підвищення напруги. Якщо у цього споживача, підключеного до шин 0,4 кВ ТП при мінімальному навантаженні (коли втрати напруги у всіх елементів мережі зменшуються прямо пропорційно навантаженню) підвищення напруги не перевищує допустимого значення (+5%), то у більш віддалених споживачів, або при більшому від мінімального навантаженні більшого підвищення напруги не буде.

Спочатку розглядається можливість застосування на РТП силового трансформатора без регулятора напруги РПН (регульована надбавка дорівнює нулю). Записавши в рядок «шини 110 кВ РТП» задане відхилення напруги в режимах максимального  $\delta U_1^{100}$  і мінімального  $\delta U_1^{25}$  навантаження та підсумувавши (з урахуванням знаку) зміни напруги в трансформаторі 110/10 кВ, одержимо відхилення напруги на шинах 10 кВ РТП (в точці 2 мережі) в обох режимах навантаження.

Розрахунки можна починати як для найближчої так і для найвіддаленішої ТП з попереднього підбору регульованої надбавки трансформатора 10/0,4кВ (межі  $\pm 2*2,5\%$ ) при мінімальному навантаженні.

Для найближчої ТП регульована надбавка одне невідоме і вона підбирається такою, щоб відхилення напруги у найближчого споживача не перевищувало +5%. Оскільки на трансформаторах 10/0,4 кВ. Застосовують регулятори напруги типу ПБЗ (перемикач без збудження), ця надбавка переноситься в режим максимального навантаження. В цьому режимі навантаження 100%, підсумувавши всі відхилення напруги (з урахуванням знаку), визначається допустима втрата напруги в лінії 0,38 кВ виходячи з того, що відхилення напруги у найвіддаленішого споживача (в точці 8) приймається граничним (-5% ).

Таблиця 1 – Визначення допустимої втрати напруги в лініях 10 кВ і 0,38 кВ та вибору надбавок у трансформаторів

Елемент мережі		Найближча ТП				Найвіддаленіша ТП			
		100%		25%		100%		25%	
		без РПН	з РПН	без РПН	з РПН	без РПН	з РПН	без РПН	з РПН
Шини 110 кВ РТП		-1,5	-1,5	+1,5	+1,5	-1,5	-1,5	+1,5	+1,5
РТП -110/10 кВ	постійна надбавка	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5
	регульована надбавка	0	+6	0	-6	0	+6	0	-6
	втрати напруги	-4	-4	-1	-1	-4	-4	-1	-1
Шини 10 кВ РТП		-0,5	+5,5	+5,5	-0,5	-0,5	+5,5	+5,5	-0,5
Лінія 10кВ		0	0	0	0	-3	-6	-1,5	-1,5
ТП 10/0,4 кВ	постійна надбавка	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5
	регульована надбавка	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	0	0	0	0
	втрати напруги	-4	-4	-1	-1	-4	-4	-1	-1
Лінія 0,38 кВ		-3	-9	0	0	-2,5	-5,5	0	0
Споживачі		-5	-5	+7	+1	-5	-5	+8	+2
Допустиме відхилення напруги		(±)-5	(±)-5	(±)+5	(±)+5	(±)-5	(±)-5	(±)+5	(±)+5

Якщо допустима втрата напруги в лінії 0,38 кВ не перевищує 10%, то розрахунок для найближчої ТП на цьому закінчується. В протилежному випадку регульована надбавка на трансформаторі 10/0,4 кВ зменшується, тому що при допустимій втраті напруги в лінії 0,38 кВ більше 10% буде мати місце підвищення напруги над допустимої межі у найближчого споживача (в точці 7).

Для віддаленої ТП (точка 6) розрахунки виконуються аналогічно. Приймавши, що в лінії 10 кВ в режимі мінімального навантаження втрати

напруги складають  $-1,5\%$ , підбирають регульовану надбавку на трансформаторі 10/0,4кВ і, перенісши її в режим максимального навантаження, визначають сумарну допустиму втрату напруги в лініях 10 і 0,38 кВ. Якщо ця допустима втрата напруги складає не менше 11..12%, то вважають, що на РТП можна обійтись без регулятора напруги РПН і сумарну допустиму втрату напруги розподіляють між лініями 10 і 0,38 кВ (приблизно порівну).

Якщо сумарна допустима втрата напруги в лініях 10 і 0,38 кВ не перевищують 10%, то для забезпечення нормованого відхилення напруги у споживачів на районній підстанції необхідно встановити трансформатор з РПН.

Найбільш прийнятний режим роботи РПН в електричних мережах з розосередженими споживачами - режим зустрічного регулювання, коли з ростом навантаження для компенсації зростаючих втрат напруги в мережі РПН підвищує напругу на шинах 10 кВ РПН, а при зменшенні навантаження, коли прямо пропорційно зменшуються і втрати напруги регулятор РПН знижує напругу на шинах 10 кВ РПН.

Зниження напруги на шинах 10 кВ РПН при мінімальному навантаженні дозволяє встановити на споживчих ТП більш високі позитивні регульовані надбавки і цим самим збільшувати допустиму втрату напруги в лініях при максимальному навантаженні.

При виборі регульованої надбавки РПН на трансформаторі 110/10 кВ керуються вказаними ПУЕ і нормами технологічного проектування сільських електричних мереж, згідно яких на РТП необхідно застосовувати зустрічне регулювання і підтримувати на шинах 10кВ відхилення напруги в межах  $+5\%$  при максимальному навантаженні і  $0\%$  - при мінімальному.

В практичних розрахунках при виборі надбавок регулятора РПН зручно використовувати уже одержані дані по відхиленню напруги на шинах 10 кВ РТП для випадку без РПН і підібрати такі регульовані надбавки РПН для режимів максимальних та мінімальних навантажень, щоб на шинах 10 кВ одержати відхилення напруги, близькі до потрібних. При цьому можуть бути використані регулятори РПН з межами регулювання  $\pm 6 \times 1,5\%$ ;  $\pm 6 \times 1,67\%$ ;  $\pm 9 \times 1,67\%$ .

Наприклад, виходячи із заданого відхилення напруги на шинах 110 кВ (т. 1) на шинах 10 кВ (т. 2) одержали відхилення напруги  $\delta U_2^{100} = +5,5\%$  ;  $\delta U_2^{25} = -0,5\%$ .

Для того, щоб в режимі максимального навантаження на шинах 10 кВ одержати відхилення напруги  $+5,5\%$ , необхідно регулятором РПН додати  $+6\%$  напруги. При застосуванні регулятора з межами регулювання  $\pm 6 \times 1,5\%$  необхідно взяти 4 ступені по  $+1,5\%$  ( $+4 \times 1,5\% = +6\%$ ) і одержимо на шинах 10 кВ (в точці 2)  $\delta U_2^{100} = +5,5\%$  (близько до потрібного відхилення  $+5\%$ ). Аналогічно в режимі мінімального навантаження прийнявши 4 ступені по  $-1,5\%$  ( $-4 \times 1,5\% = -6\%$ ) одержимо на шинах 10 кВ (в точці 2)  $\delta U_2^{25} = -0,5\%$  (близько до нуля).

Після вибору регульованих надбавок регулятора РПН подальші розрахунки проводяться в такому ж порядку, як і для випадку без РПН.

Якщо допустима втрата напруги в лінії 0,38 кВ не перевищує 10%, то розрахунок для найближчої ТП на цьому закінчується. В протилежному випадку визначають сумарну допустиму втрату напруги в лініях 10 і 0,38 кВ.

Якщо ця допустима втрата напруги складає не менше 11...12% то вважають, що на РТП можна обійтись без регулятора напруги РПН і сумарну допустиму втрату напруги розподіляють між лініями 10 і 0,38 кВ (приблизно порівну).

Якщо сумарна допустима втрата напруги в лініях 10 і 0,38 кВ не перевищують 10% (в нашому випадку допустима втрата напруги складає:  $-3-2,5=5,5\%$ ), то для забезпечення нормованого відхилення напруги у споживачів на районній підстанції необхідно встановити трансформатор з РПН.

Зниження напруги на шинах 10 кВ РПН при мінімальному навантаженні дозволяє встановити на споживчих ТП більш високі позитивні регульовані надбавки і цим самим збільшувати допустиму втрату напруги в лініях при максимальному навантаженні.

**Висновки.** Як показують результати розрахунку в табл.1, без наявності регулятора РПН на підстанції 110/10 кВ забезпечити нормоване відхилення напруги ( $\pm 5\%$ ) у споживачів та забезпечити допустиму втрату напруги в лініях 10 і 0,38 кВ неможливо.

Так, в режимі мінімальних навантажень відхилення напруги у ближчого електроприймача *віддаленої ТП* у випадку відсутності на підстанції 110/10 кВ РПН складає  $+8\%$ , а при наявності РПН  $+2\%$ . Допустима сумарна втрата напруги в лініях 10-0,38 кВ при відсутності РПН складає  $-5,5\%$ , а при наявності РПН  $-11,5\%$ .

Подібна ситуація складається і в споживачів *найближчої ТП*. В режимі мінімальних навантажень відхилення напруги у ближчого електроприймача у випадку відсутності на підстанції 110/10 кВ РПН складає  $+7\%$ , а при наявності РПН  $+1\%$ . Допустима сумарна втрата напруги в лініях 10...0,38 кВ при відсутності РПН складає  $-3\%$ , а при наявності РПН  $-9\%$ .

Підвищити ефективність системи регулювання напруги можливо за допомогою розглянутого алгоритму регулювання напруги, якщо забезпечити формування регульовальної дії регуляторів з урахуванням вхідних сигналів про вихід напруги за допустимі межі в найближчій і найвіддаленішій із споживчих ТП 10/0,4 кВ. При цьому підвищується якість напруги на шинах споживачів, надійність пристрою РПН внаслідок зменшення кількості його перемикачів, а також знижуються втрати електроенергії в розподільній електричній мережі за рахунок підтримання в допустимих межах значення напруги на шинах підстанцій.

#### Перелік посилань

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

2. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: ГОСТ 13109-97. – К.: Держбуд України, 1999.

3. Основи електропостачання: Навч. посіб /А.О.Омельчук – К.: ЦП «Компринт», 2019. – 415 с. ISBN 978-966-929-967-3.