

УДК 621.316.1.017

А.О. ОЗЕРЯНСЬКИЙ, канд. техн. наук, О.А. БІЛИК (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМИХ ВИМІРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Обґрунтовано висновки про використання мінімально потрібної кількості прямих вимірів переданої лінією потужності при визначенні технологічних витрат електроенергії в розподільних мережах, яка істотно відрізняється від прийнятої та дозволяє уникнути суттєвого завищення останніх.

У вітчизняній практиці для визначення технологічних витрат електроенергії (ТВЕ) у розподільних мережах (РМ) рано чи пізно доведеться все одно ліквідувати практику отримання результатів, тобто власне ΔW_n , на основі все ще розповсюджених моделей завантаження мереж з орієнтовними, "типовими" графіками навантаження [1, 2], або шляхом використання усереднених формул – такі, як правило, пропонуються для отримання величин \max -інтервалу, τ . Причини цього також добре відомі – невисока точність визначення ТВЕ, що досягається в обох випадках, не дозволяє виявити так звані "приховані" витрати та при цьому не пояснює наявність "занадто високих... по Україні" [3] величин останніх. Впровадження у вітчизняну практику використання РМ сучасних вимірювальних приладів, наприклад таких, які випускаються фірмами Siemens, Schlumberger, Landis & Gyr, – єдино можливий успішний розвиток ситуації в даній області техніки. Загальновідомим є те, що за всієї безсуперечності цього висновку економічні труднощі не дозволяють сподіватися на розв'язання даного протиріччя навіть у досить віддаленому майбутньому. Але поступово, тобто в невеликих обсягах, зміни ситуації слід очікувати – питання полягає в отриманні обґрунтованих співвідношень між кількістю (за останній слід визначити вид замірів, їх кількість та економічні витрати для цього) та якістю (тут слід назвати досягнення заданої точності розрахунку ТВЕ та економічні вигоди від цього).

В даній статті поставлена мета деталізується відносно одиначної розімкнутої РМ, а також конкретно вирішується питання визначення потрібної кількості вимірів витрат енергії.

Вихідні передумови при цьому є такими:

- передбачається використання універсального графіка навантаження (рис. 1), зміна $P(T)$ для якого фіксується через однакові, i -ті, $1 < i \leq n$, проміжки часу, рівні ΔT ;
- між найближчими i -ми $[i\Delta T \div (i+1)\Delta T]$ проміжками величина $P(T)$ встановлюється як

незмінна, $P(T) = P_i = \text{const}$, тобто зберігаються умови

$$\Delta W_i = P_i \cdot \Delta T, \quad W_{del} = \sum_{i=1}^n \Delta W_i,$$

де ΔW_i , W_{del} – значення витрат енергії через дану РМ, у т. ч. під час i -го інтервалу та сумарного;

– за базову використовується методика визначення ТВЕ на основі методу максимальних витрат, де основний розрахунковий вираз для визначення ΔW_n (активна складова) записується в такому вигляді

$$\Delta W_n = 3 \left(\frac{P_{max}}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 R \cdot \tau = \frac{R}{U^2} \cdot P_{max}^2 \cdot \tau, \quad (1)$$

де P_{max} – величина переданої по лінії потужності, R – активний опір за довжиною лінії;

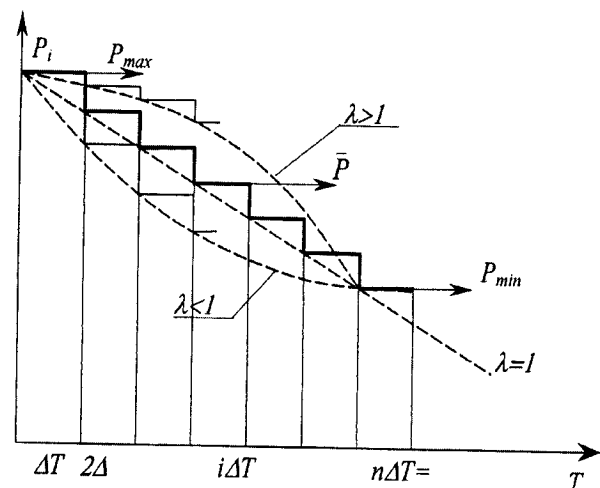


Рис. 1

– у представлених багатоступеневих графіках навантаження (ГН) кожна окрема сходинка є результатом лише одного виміру, причому вимірюється кількість енергії, ΔW_i , за i -й інтервал, а значення середньої за цей час потужності обчислю-

ється $\bar{P}_i = \Delta W_i / \Delta T$, та вже з цих значень формується вказаний ГН і визначаються його параметри P_{max} та P_{min} . При такому визначенні показників $P(i)$ баланс енергії виконується автоматично;

– зміна $P(T)$ може в загальному вигляді мати довільну послідовність. На рис. 1 представлено як базові найбільш виразні варіанти послідовності універсального графіка, в т.ч. з випуклою, $\lambda > 1$, увігнутою, $\lambda < 1$ та лінійною, $\lambda = 1$, формами:

$$P(i) = P_{max} - \Delta P \cdot \left((i-1) \frac{\Delta T}{T_Y} \right)^\lambda, \quad \lambda > 1,$$

$$P(i) = P_{min} + \Delta P \times \left[1 - \left((i-1) \frac{\Delta T}{T_Y} \right)^{1/\lambda} \right], \quad \lambda < 1,$$

$$P(i) = P_{max} - \Delta P \cdot (i-1) \frac{\Delta T}{T_Y}, \quad \lambda = 1,$$

де

$$\lambda = \frac{\bar{P} - P_{min}}{P_{max} - \bar{P}}, \quad \Delta P = P_{max} - P_{min};$$

– всі наведені висновки розповсюджуються тільки для умов розрахунку технологічних витрат електроенергії та не можуть бути віднесені до інших задач, наприклад, з формування показників передачі електроенергії тощо.

Визначення числа вимірів

В основу даної задачі закладено таку умову: кількість вимірів повинна бути мінімально необхідною, n_{min} , але достатньою, щоб відхилення побудованого на основі вимірів наближеного графіка навантаження від деякого граничного з можливих не призвело б до підвищення величини технологічних витрат електроенергії вище наперед заданої величини, в загальному випадку рівної k відсотків. Звертаючись до формули 1, потрібно деталізувати дану задачу таким чином:

– з дотриманням умов постійності P_{max} для обох можливих ГН отримати значення мах-інтервалу, τ , і для наближеного ГН, коли

$$\tau = \tau_\Sigma, \quad n = n_{min}, \quad \Delta W_n = \Delta W_{n\Sigma}$$

і для граничного ГН, коли ГН повністю відповідає фактичному

$$\tau = \tau_S, \quad n = \infty, \quad \Delta W_n = \Delta W_{nS}$$

та по співставленню розходження у відносному вигляді

$$\delta(\Delta W_n) = \frac{\Delta W_{n\Sigma} - \Delta W_{nS}}{\Delta W_{nS}} \cdot 100\% \leq k\% \quad (2)$$

визначити шукану кількість вимірів n_{min} .

Вказана послідовність дій виконана для обох варіантів, $\lambda \geq 1$ та $\lambda < 1$, графіків навантаження.

Для першого варіанта $\lambda \geq 1$ основні вирази будуть такими:

$$\left\{ \begin{aligned} P_i(i) &= P_{max} - \Delta P \cdot \left(\frac{i-1}{n-1} \right)^\lambda; \\ (\Delta P &= P_{max} - P_{min}), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_i^2(i) &= \left[\frac{P(i)}{P_{max}} \right]^2 = 1 - \\ &- 2A \cdot \left(\frac{i-1}{n-1} \right)^\lambda + A^2 \left(\frac{i-1}{n-1} \right)^{2\lambda}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

де $A = 1 - \sigma_{min}$, $\sigma_{min} = P_{min}/P_{max}$, $\sigma_i(i) = P_i(i)/P_{max}$, звідки значення часткового i -го мах-інтервалу, $\tau_i(i)$, та повного $\tau_{I\Sigma}$,

$$\tau_i(i) = \Delta T \cdot \sigma^2(i). \quad (5)$$

$$\tau_{I\Sigma} = \sum_n \tau_i(i) = T_Y \left[1 - \frac{2A}{n(n-1)^\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sum_n (i-1)^\lambda + \frac{A^2}{n(n-1)^{2\lambda}} \cdot \sum_n (i-1)^{2\lambda} \right]. \quad (6)$$

Розраховане таким чином значення мах-інтервалу буде тим точніше, чим більшу кількість вимірів буде зроблено. У граничному випадку, $n \rightarrow \infty$, зникає запізнювання у формулі для основних коефіцієнтів, $i\Delta T \rightarrow T$, $di \rightarrow dt$, $(i-1) \rightarrow i$, $(n-1) \rightarrow n$, тобто

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=1}^n \sigma^2(i) \Delta T \right] &= \int_0^{T_Y} \sigma^2(T) dT, \\ \int_0^{T_Y} \sigma^2(T) dT &= \int_0^{T_Y} \left[1 - \frac{2A}{T_Y} T + \frac{2A}{T_Y^2} T^2 \right] dT = \dots \\ \dots &= T_Y \left[1 - \frac{2A}{(\lambda+1)} + \frac{A^2}{(2\lambda+1)} \right]. \\ \tau_{I\Sigma} &= T_Y \left[1 - \frac{2A}{(\lambda+1)} + \frac{A^2}{(2\lambda+1)} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Різниця у визначенні наведених виразів для мах-інтервалу, формули (6)-(7), не випадкова.

В монографії А.К.Казанцева [2] у визначенні мах-інтервалу надано окремий (аналогічний з (7), а не загальний (6), результат, що в загальному випадку і призведе до досить суттєвої похибки.

Ступінь похибки визначення величини втрат ΔW_n прямо пропорційно (1) залежатиме від різниці між точним (7) та приблизним (6) значеннями мах-інтервалу. В безрозмірному вигляді задачу отримання заданої, до k відсотків, точності можна записати у вигляді обов'язковості досягнення умови

$$\delta_{(\tau)} = \frac{\tau_{\Sigma} - \tau_S}{\tau_S} \cdot 100\% \leq k(\%).$$

Складність аналізу з використанням даної умови полягає у неможливості отримання виразу τ_{Σ} у загальному вигляді, але існує можливість передбачити варіанти, коли означена відносна різниця $\delta(\tau)$ набуватиме граничних, тобто максимально можливих значень.

Не наводячи через громіздкість детального аналізу, можна визначити кінцеві висновки в тому, що зазначена гранична різниця між мах-інтервалами τ_{Σ} та τ_S буде знайдена як гранична між трьома, знову-таки граничними, можливими алгоритмами зміни графіка навантаження (рис. 2). Будь-які конкретні випадки будуть тією чи іншою мірою складатися з наведених трьох, причому, як видно з рисунка, зазначені алгоритми можуть бути присутні як для всього ГН, так і для окремої i -ї сходянки графіка. (Надалі аналіз наводиться для першого, весь ГН, випадку.)

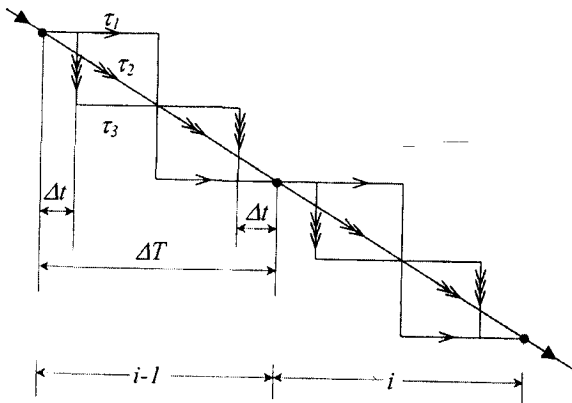


Рис. 2

При цьому в першому, τ_1 на рис. 2, алгоритмі зміни ГН на всьому інтервалі ΔT відбувається у вигляді одного початкового максимуму. Якщо припустити, для спільності, що весь ГН складається з одного ступеня з $P = \bar{P}_{\max}$ $\sigma = P / P_{\max} = 0.5$, то для наведених алгоритмів ГН величина втрат

ΔW_{ni} зменшиться від першого до двох останніх

$$\Delta W_{n1} = \frac{R}{U^2} 2(\bar{P}^2 T_Y),$$

$$\Delta W_{n2} = \frac{R}{U^2} 1.33(\bar{P}^2 T_Y),$$

$$\Delta W_{n3} = \frac{R}{U^2} (1 + 2\Delta t) \cdot (\bar{P}^2 T_Y).$$

Як виявилось, більш загальним є варіант отримання граничної різниці між першим і другим алгоритмами, тобто кількість вимірів має бути достатньою для локалізації саме другого алгоритму, коли графік навантаження змінюється лінійно, $\lambda=1$. Результат при цьому досягає найбільшого значення ще за максимальної різниці між P_{\max} і P_{\min} , тобто коли $P_{\min} = 0$, $A = 1$.

Для таких умов та при задаванні розходження (2), що дорівнює $k(\%) = (2 \div 4)\%$

$$\tau_{\Sigma} = \frac{6(1-A) \cdot (n-1) + A^2(2n-1)}{6(n-1)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{n-0.5}{n-1},$$

$$\tau_S = 1 - A + \frac{A^2}{3} = 0.33,$$

$$n_{\min} \geq 1 + \frac{100}{2|k|} = (13 \div 25).$$

Тобто для того, щоб уникнути завищення результатів при визначенні величини ТВЕ, зводячи останні до досить прийнятних для практики значень, не більше $(\pm 2 \div \pm 4)\%$, необхідно за період перевірки забезпечити не менше 13 при $k = \pm 4\%$, або 25 при $k = \pm 2\%$, вимірів.

Визначення ступеня похибки

Тут доцільно зазначити, що наведені відсотки розходження $k(\%)$ не належать безпосередньо до відсотків розходження відповідно до технологічних втрат електроенергії, вони потрібні для локалізації алгоритму зміни ГН, тобто є допоміжним засобом. А для того, щоб оцінити ступінь похибки розрахунку ТВЕ, необхідно провести порівняння за даною ознакою між значеннями ΔW_n , що ототожнюють, за решти однакових умов, вже власне алгоритми ГН. Для цього треба припустити, що один із режимів, наприклад лінійний, $\tau_S = \tau_2$, є реальним, а перший помилково локалізованим через малу (тільки один) кількість вимірів. Тоді похибка визначен-

ня величини втрат за вже зазначених рівних умов стане досить істотною

$$\delta(\tau) = \frac{0.5 - 0.33}{0.33} \cdot 100\% = \\ = |50\%| = \pm 25\%.$$

Доцільно зазначити, що цей результат істотно доповнює висновки, запропоновані в монограмі А.К.Казанцева [2], де наводиться можлива цифра, яка дорівнює $|10\%| = \pm 5\%$. Реальна неточність, як бачимо, може бути значно вищою.

Якщо бути ще точнішим, то теоретично за можливе необхідно визнати також наведений на рис. 2 алгоритм зміни ГН з проблісковою зміною режимів $P_{\max} - P$, τ_3 на рис. 2. Означений режим стає мінімальним за параметром ТВЕ, в т.ч. відносно лінійного алгоритму, для малих кутів включення P_{\max} , конкретно при $0.1 \leq \Delta t / \Delta T \leq 0.16$. Втім, наявність таких режимів дуже мало ймовірна і в даному разі з аналізу виключена.

Зменшення похибки обчислення величини втрат від $\pm 25\%$ до $\pm(2 \div 4)\%$ дозволить значно зменшити невиправдані витрати, обґрунтувати введення додаткової апаратури та ускладнення технології визначення ТВЕ. Проте, це вже інше питання. Насамкінець треба зазначити, що такий самий висновок, у т.ч. в числах, буде отримано, якщо взяти за основу інший, $\lambda < 1$, варіант передачі енергії, що проходить мережею. Комплект кінцевих виразів для визначення мах-інтервалу в цьому разі становитиме такі чотири формули:

$$P_{II}(i) = P_{\min} + \Delta P \left(\frac{n-i}{n-1} \right)^{1/\lambda},$$

$$\sigma_{II}^2(i) = 1 - 2A \cdot \left(\frac{n-i}{n-1} \right)^{1/\lambda} + A^2 \left(\frac{n-i}{n-1} \right)^{2/\lambda},$$

$$\tau_{II\Sigma} = T_Y \left[1 - \frac{2A}{n(n-1)^{1/\lambda}} \cdot \sum^n (n-i)^{1/\lambda} + \right. \\ \left. + \frac{A^2}{n(n-1)^{2/\lambda}} \cdot \sum^n (n-i)^{2/\lambda} \right],$$

$$\tau_{II\lambda} = T_Y \left[1 - \frac{2A}{1+\lambda} + A^2 \frac{2}{(1+\lambda)(2+\lambda)} \right].$$

Легко пересвідчитись, що при граничному, $\lambda=1$, переході від ступінчастого до лінійного алгоритму зміни енергії, що передається, комплект знову перетворюється в уже наведені вирази (формули (4)-(7) для $\lambda=1$).

Висновки

1. При використанні в розподільних мережах контрольно-вимірювальної апаратури з автоматичним відліком достатньої локалізації режимів завантаження мереж буде досягнуто за наявності (13÷25) вимірів за інтервал контролю; точність розрахунку технологічних витрат електроенергії за даною ознакою не перевищить при цьому $\pm(2 \div 4)\%$.

2. Невикористання контрольно-вимірювальної апаратури для складання фактичного графіка навантаження може призводити, лише за однією ознакою, тобто через неточність форми графіка, до похибки у визначенні величини технологічних витрат електроенергії $\pm 25\%$.

1. Держский В.Г. и др. Расчет потерь электроэнергии в распределительных сетях (0.4-154)кВ и формирование системы розничных тарифов. - К.: "Знание Украины", 1998. - 68 с.

2. Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н. и др.; под редакцией Казанцева В.Н. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 368 с.

3. Огляд української преси з питань ПЕК / Випуск НГСЕ України №227 (16÷30 червня 2003 р.). К.: - 2003. - 34 с.

4. А.А. Озерянский, А.А. Билык. Информационно-аналитическая система "информация-погрешность" для задач расчета технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях // Проблемы общей энергетики. - 2003. - №7. - С. 60-63.