

Частина I. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.313.333

М.О. Костін, д-р техн. наук, О.Г. Шейкіна, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна)

ІМОВІРНІСНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ВІД РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФРИЗЕ

Вступ

Задача оцінки електроефективності будь-якого пристрою чи системи містить в собі необхідність визначення в ній технологічних втрат електроенергії. Ці втрати – втрати на передачу і розподілення електроенергії і які мають дві складові [1-3]: втрати при транспортуванні електроенергії та втрати при її реалізації. Окрім цієї класифікації технологічні втрати розподіляються на основні та додаткові. Зазначене є чинним і для системи електричної тяги постійного струму. В ній основні втрати обумовлені передачею лише активної енергії в електрорухомий склад, і вони мають місце, коли система "тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад" (ТП – ТМ – ЕРС) працює в симетричному та стабільному, за характером споживання (коли миттєва потужність є незмінною величиною), режимі. У цьому режимі, який деякі автори називають "оптимальним", відсутні всі фактори неякості електроенергії. Основні втрати являються необхідними по суті передачі енергії і тому неминучі; вони повинні бути зменшені лише до оптимального рівня.

Додаткові втрати пов'язані з неякісністю електроенергії, а останні в системі електричної тяги існують обов'язково, бо ці втрати електроенергії не є необхідними при її передачі по ЛЕП до ТП і від ТП до ЕРС, а тому вони мають бути зменшені до мінімуму. На сьогодні не існує приладів і методів експериментального визначення взагалі технологічних, й тим більше додаткових, втрат електроенергії. А існуюча з 2003 р. і затверджена наказом № 342 Укрзалізниці "Методика розрахунку технологічних втрат у пристроях електропостачання" базується на показаннях лічильників електроенергії, спожитої за місяць поїздами на міжпідстанційній зоні. Як відомо, використовувані індукційні чи електронні лічильники недостовірно оцінюють несинусоїдні енергетичні процеси, що протікають у системах з нелінійними нестационарними навантаженнями. Тому єдиний шлях визначення додаткових втрат – розрахунковий. Складність і особливість цих розрахунків полягає в тому, що тягові напруги і струми в розглядуваній системі являються стохастичними процесами, а отже, і додаткові втрати електроенергії мають імовірнісний характер, що і досліджується у цій роботі.

Теоретичні залежності

З проблемою знаходження додаткових втрат електроенергії тісно пов'язані питання оцінки складових повної потужності, і зокрема, оцінка реактивної потужності. Загальновідома [4, 5] неоднозначність поняття та визначення реактивної потужності для кіл несинусоїдного струму, якими і є тягові мережі. Однак усі дослідники [4, 6], стосовно проблеми визначення втрат потужності як в усталених, так і в перехідних режимах роботи системи мають єдину думку, що найбільш правильною та ефективною є концепція С. Фризе [7]. Згідно з цією концепцією і теоретичною електротехнікою, ЕРС, як пасивний двополіусник зі струмом $i(t)$ довільної форми, подамо паралельним з'єднанням резистивного елемента, що відображає споживану активну електроенергію, та реактивного елемента, що характеризує споживання неактивних складових потужності: реактивної потужності та потужності спотворення. Вважається, що у вітці з резистивним елементом протікає активна складова струму $i_a(t)$, яка збігається за формою з прикладеною до споживача напругою $u_e(t)$. У реактивному елементу протікає реактивна складова струму $i_p(t)$, що ортогональна до напруги $u_e(t)$. Тоді згідно з першим законом Кірхгофа миттєве значення струму

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t), \quad (1)$$

а діюче:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (2)$$

Тоді додаткові втрати електроенергії в резисторі з опором R за певний проміжок часу τ визначаються як

$$\Delta W_d = RI_p^2 \tau = R \frac{U^2}{U^2} I_p^2 \tau = R \frac{Q_\Phi^2}{U^2} \tau. \quad (3)$$

У цьому виразі для додаткових втрат потужності величина еквівалентного опору R є детермінованою, а величина діючого значення напруги U змінюється дуже слабо: наприклад, для підстанції Горяїново Придніпровської залізниці ця напруга знаходиться в межах 3323...3353 В, $\sigma_U = 5$ В, тобто діюче значення U можна вважати незмінним. Отже, тоді ΔW_d є функцією лише однієї випадкової величини, якою є реактивна потужність по Фризе Q_Φ . Користуючись теорією розподілу функцій випадкових аргументів [8] і формулою (3), отримаємо закон розподілу випадкової величини ΔW_d . Для цього уявимо, що випадкова величина реактивної потужності розподіляється за певним законом $g(Q_\Phi)$. Утворимо обернену функцію $Q_\Phi(\Delta W_d)$ від виразу (3):

$$Q_\Phi = \sqrt{\frac{U^2 \Delta W_d}{R\tau}}. \quad (4)$$

Візьмемо похідну від виразу (4) по змінній ΔW_d :

$$\frac{dQ_\Phi}{d(\Delta W_d)} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U^2}{\Delta W_d R\tau}}. \quad (5)$$

Тоді шуканий закон розподілу додаткових втрат ΔW_d можна записати так:

$$f(\Delta W_d) = g\left(\sqrt{\frac{U^2 \Delta W_d}{R\tau}}\right) \left| \frac{dQ_\Phi}{d(\Delta W_d)} \right| = g\left(\sqrt{\frac{U^2 \Delta W_d}{R\tau}}\right) \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U^2}{\Delta W_d R\tau}}. \quad (6)$$

Користуючись формулою (3), запишемо ймовірнісні характеристики ΔW_d , а саме: математичне сподівання

$$M[\Delta W_d] = M\left[R \frac{Q_\Phi^2}{U^2} \tau\right] = \frac{R\tau}{U^2} M[Q_\Phi^2] = \frac{R\tau}{U^2} \left((M[Q_\Phi])^2 + D[Q_\Phi] \right) = \frac{R\tau}{U^2} \left(m_{Q_\Phi}^2 + \sigma_{Q_\Phi}^2 \right), \quad (7)$$

дисперсію

$$D[\Delta W_d] = \frac{R\tau}{U^2} D[Q_\Phi^2] = 2 \frac{R\tau}{U^2} \left(M[Q_\Phi] \right)^2 \cdot D[Q_\Phi] + D^2[Q_\Phi] = 2 \frac{R\tau}{U^2} m_{Q_\Phi}^2 \sigma_{Q_\Phi}^2 + \sigma_{Q_\Phi}^4, \quad (8)$$

де $M[...]$ чи m – математичне сподівання;

$D[...]$ чи σ – дисперсія чи середньоквадратичне відхилення.

Якщо величина ΔW_d розподіляється за законом Гаусса, то її абсолютні значення знаходяться у такому інтервалі:

$$m_{\Delta W_d} - 3 \sqrt{2 \frac{R}{U^2} m_{Q_\Phi}^2 \sigma_{Q_\Phi}^2 + \sigma_{Q_\Phi}^4} \dots m_{\Delta W_d} + 3 \sqrt{2 \frac{R}{U^2} m_{Q_\Phi}^2 \sigma_{Q_\Phi}^2 + \sigma_{Q_\Phi}^4}. \quad (9)$$

Отже, як впливає із цього виразу, абсолютні значення додаткових втрат електроенергії суттєво, у другому та четвертому степенях, залежать від середньоквадратичного відхилення, тобто коливань, реактивної потужності по Фризе Q_{Φ} , а остання зростає при збільшенні коливань тягового струму. Тому встановимо, якою мірою математичне сподівання і дисперсія величини додаткових втрат $\Delta W_{\text{д}}$ залежать від коливань повного фідерного струму I . Для цього отримаємо вираз $\Delta W_{\text{д}}$, що впливає із формул (3) і (2):

$$\Delta W_{\text{д}} = \frac{U^2 I_p^2}{U^2} R\tau = \left(I^2 - \frac{P^2}{U^2} \right) R\tau = \left(RI^2 - R \frac{P^2}{U^2} \right) \tau = \left(RI^2 - RP^2 U^{-2} \right) \tau. \quad (10)$$

Виконаємо операцію математичного сподівання над виразом (10) і отримаємо

$$\begin{aligned} M[\Delta W_{\text{д}}] &= R\tau M\left[I^2 \right] - R\tau \frac{M\left[P^2 \right]}{M\left[U^2 \right]} = R\tau \left(M\left[I \right]^2 + D\left(I \right) \right) - R\tau \frac{\left(M\left[P \right]^2 + D\left(P \right) \right)}{\left(M\left[U \right]^2 + D\left(U \right) \right)} = \\ &= \left(R\bar{I}^2 + R\sigma_I^2 - R \frac{\bar{P}^2 + \sigma_P^2}{\bar{U}^2 + \sigma_U^2} \right) \tau = R\tau \left(\bar{I}^2 + \sigma_I^2 - \frac{\bar{P}^2 + \sigma_P^2}{\bar{U}^2 + \sigma_U^2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Тоді дисперсія додаткових втрат

$$\begin{aligned} D[\Delta W_{\text{д}}] &= R\tau 2\left(M\left[I \right]^2 \cdot D\left[I \right] + R\tau \left(D\left[I \right] \right)^2 \right) - R\tau \frac{2\left(M\left[P \right]^2 \cdot D\left(P \right) + \left(D\left[P \right] \right)^2 \right)}{2\left(M\left[U \right]^2 \cdot D\left(U \right) + \left(D\left[U \right] \right)^2 \right)} = \\ &= R\tau \left(2\bar{I}^2 \cdot \sigma_I^2 + \sigma_I^4 - \frac{2\bar{P}^2 \cdot \sigma_P^2 + \sigma_P^4}{2\bar{U}^2 \cdot \sigma_U^2 + \sigma_U^4} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Як впливає з виразів (11) і (12), зі збільшенням середньоквадратичних відхилень діючих значень фідерних напруги σ_U і струму σ_I зростають як математичне сподівання, так і дисперсія додаткових втрат електроенергії в елементах системи електротяги. Найбільшу дію на дисперсію втрат чинять коливання струму, що видно із виразу (12), в якому має місце доданок σ_I^4 .

Чисельні розрахунки та їх аналіз

За допомогою отриманих раніше теоретичних виразів була виконана оцінка впливу коливань реактивної потужності по Фризе на додаткові втрати в тяговій мережі міжпідстанційної зони А – Б реально діючої електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці. З цією метою було здійснено моніторинг фідерних напруг і струмів, виконано їх імовірісно-статистичну обробку, що дозволило отримати необхідні значення потужності Q_{Φ} і відповідні значення додаткових втрат електроенергії $\Delta W_{\text{д}}$, результати яких наведені у таблиці і на рис. 1–4.

Як впливає з таблиці, зі збільшенням середньоквадратичного відхилення фідерного струму σ_I зростає як математичне сподівання $m_{Q_{\Phi}}$, так і середньоквадратичне відхилення $\sigma_{Q_{\Phi}}$ реактивної потужності по Фризе, що у свою чергу згідно з виразами (7) – (9) обумовлює зростання також як математичного сподівання, так і дисперсії додаткових втрат електроенергії в тяговій мережі системи електротяги.

Таблиця

Середньоквадратичне відхилення струму σ_I та ймовірнісні характеристики реактивної потужності Фризе

Номер доби		1	2	3	4	5	6	7
Середньоквадратичне відхилення струму σ_I, A		469,0	486,7	486,7	493,1	498,7	504,0	512,2
Реактивна потужність по Фризе, Q_{Φ}	$m_{Q_{\Phi}}, \text{Мвар}$	0,726	0,766	0,818	0,833	0,889	0,921	0,951
	$\sigma_{Q_{\Phi}}, \text{Мвар}$	0,639	0,647	0,676	0,686	0,770	0,756	0,763

Закономірність імовірнісної залежності ΔW_d від Q_ϕ чітко прослідковується як за відповідністю залежностей Q_ϕ (рис. 1) і ΔW_d (рис. 2), так і за законами розподілу цих величин (рис. 3 і 4): визначений за виразом (6) (і експериментально отриманий (рис. 3)) нормальний закон розподілу добових додаткових втрат $f(\Delta W_d)$ обумовлений тим самим законом розподілу потужності Q_ϕ (рис. 4).

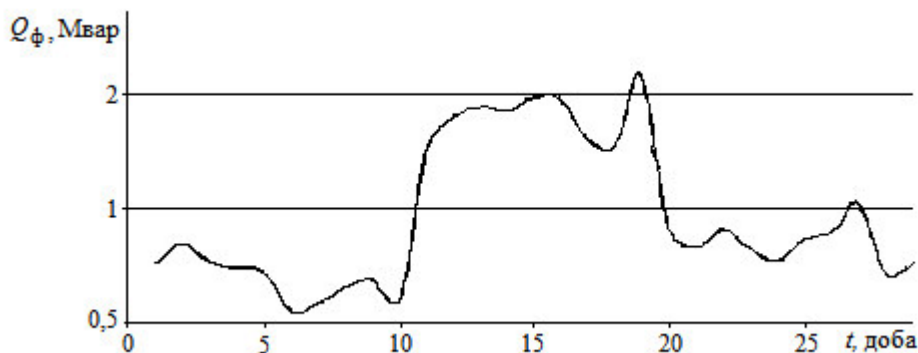


Рис. 1. Добові залежності реактивної потужності Q_ϕ , що передається одним фідером тягової підстанції А у напрямку тягової підстанції Б

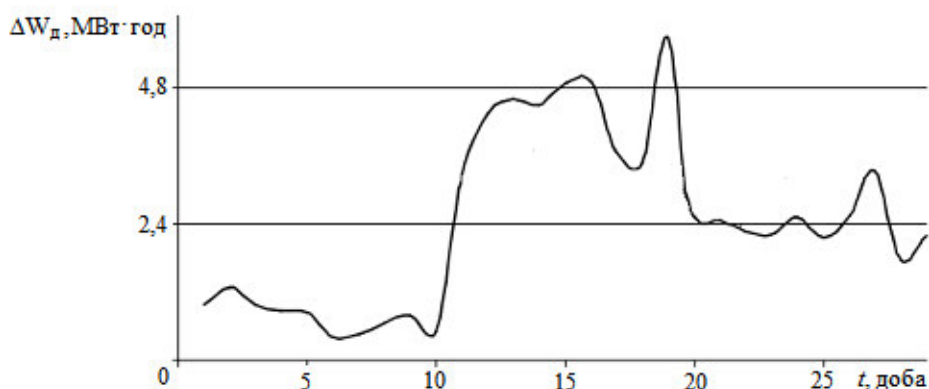


Рис. 2. Добові залежності додаткових втрат електроенергії в тяговій мережі ділянки А – Б

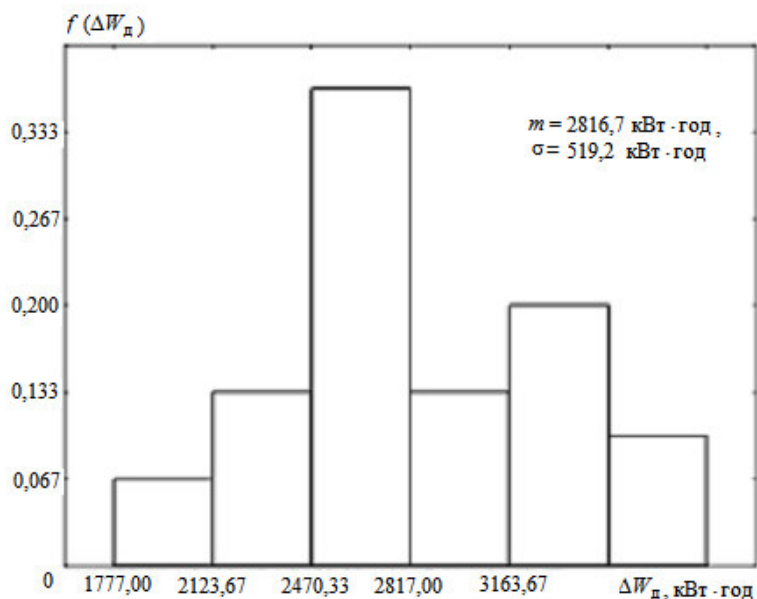


Рис. 3. Гістограма статистичного розподілу добових величин додаткових втрат електроенергії в тяговій мережі ділянки А – Б

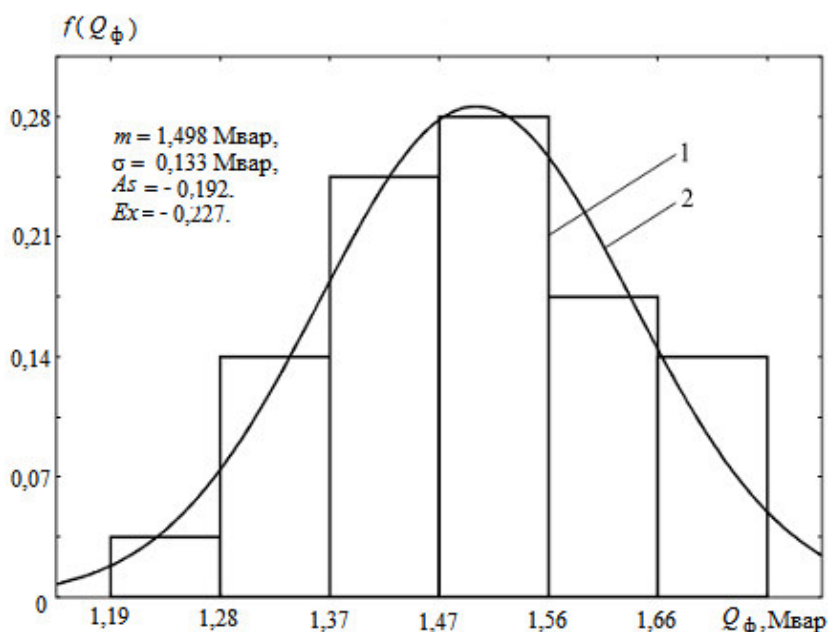


Рис. 4. Вигляд статистичного (1) і теоретичного (2) законів розподілу добових значень реактивної потужності Фризе, що передаються фідером тягової підстанції А на ділянці А – Б

Висновки

1. Фідерні струми міжпідстанційної зони системи тягового електропостачання постійного струму являють собою випадкові величини, характер зміни яких суттєво впливає на енергетичні характеристики системи.

2. Зі збільшенням дисперсії струмів σ_I^2 зростає як математичне сподівання, так і дисперсія реактивної потужності по Фризе.

3. У свою чергу коливання реактивної потужності суттєво впливають на дисперсію додаткових втрат електроенергії в тяговій мережі системи електротяги.

Список літератури

1. Дерзкий В. Г. Методика расчета потерь электроэнергии в электрических сетях облэнерго/ В. Г. Дерзкий. – К.: Знание Украины, 2001. – 56 с.
2. Железко Ю. С. Расчет технологических потерь электроэнергии в электрических цепях/ Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко// Энергетик. – 2003. – № 2. – С. 29 – 33.
3. Железко Ю. С. Методика расчета нормативов технологических потерь электроэнергии/ Ю. С. Железко// Электричество. – 2006. – № 12. – С. 10 – 17.
4. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в электрических цепях/ В. Е. Тонкаль, В. А. Новосельцев, С. П. Денисюк. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
5. Костін М. О. Неоднозначність визначення поняття "реактивна потужність" в колах несинусоїдних електричних величин/ М. О. Костін, О. Г. Шейкіна// Гірн. електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2002. – Вип. 69. – С. 3-8.
6. Денисюк С. П. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами: дис. д-ра техн. наук: С. П. Денисюк – К.: Київський політехн. ін-т, 2001. – 455 с.
7. Fryse S. Wirk – Blind – und Schein – leistung in elektrischen stromkreisen min nichtsinusformigen Verfap von Strom und Spannung//Elektrotechn. Z. – 1932. – 25. – S. 596-599; 26. – S. 625-627; 29. – S. 700-702.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей [для студ. вузов] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1965. – 576 с.

Рекомендовано до друку проф. Дубицием Л.В.