

СЕКЦІЯ 1: КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

РОЗРАХУНОК БАЛАНСНИХ ПОТОКІВ ПОТУЖНОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ВТРАТ ПРИ СИСТЕМНОМУ ЕКВІВАЛЕНТУВАННІ

Банін Д.Б., к.т.н., доцент, Малмигіна Н.Т., магістрант, Пашков Д.Ю., магістрант

НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Повсякденним явищем диспетчерського управління є розрахунок усталеного режиму в магістральних та розподільчих мережах енергосистем та електропередавальних компаній. При цьому визначаються втрати потужності, обсяги яких свідчать про рівні завантаження мереж та якість керування режимом [4]. В сучасній енергетиці України обсяги втрат сягають великих значень, як за міжнародними стандартами, так і за державними нормативами.

Для розробки методик зменшення сумарних втрат необхідно якісно оцінити які балансні потоки їх спричиняють та з яких компонентів ці втрати складаються. Тобто, треба вміти класифікувати втрати.

Постановка задачі. Першочергово визначимо, що втрати в електричній мережі є результатом взаємодії потоків трьох категорій:

- потоки від активних і реактивних навантажень споживачів електроенергії;
- потоки від поперечних провідностей ліній, реакторів та трансформаторів;
- потоки від зрівнювальних контурних струмів.

Зазначені явища виникають в мережах за різними причинами і по різному впливають на процеси в системі. Потоки від контурних струмів створюються в мережах від їх невірноваженості, від різних коефіцієнтів трансформації в контурах, від напруги балансуєчих вузлів, що з'єднані транзитними лініями, тощо. Потоки від некомпенсованих поперечних провідностей значно впливають на втрати в мережах надвисокої напруги. Нарешті, потоки від навантажень залежать від їх коефіцієнтів потужності, місцезрештування, віддаленості від живлячих вузлів та рівня оптимізації режиму за критерієм мінімуму втрат активної потужності.

В даній статті наведено методику класифікації втрат і чисельного визначення їх обсягів згідно указаних балансних потоків потужностей.

Матеріали і результати дослідження. Відомо, що зв'язок між напругами і струмами вузлів електричної мережі може бути описаний системою рівнянь усталеного режиму у формі балансу струмів згідно фундаментальних залежностей ТОЕ [1]:

$$\dot{Y} \cdot \dot{U} = \dot{I} \quad (1)$$

Представимо вираз (1) по складовим балансуєчих вузлів (індекс b) та вузлів з навантаженнями (індекс n):

$$\begin{cases} \dot{Y}bb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}bn \cdot \dot{U}n = \dot{I}b + \dot{I}by \\ \dot{Y}nb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}nn \cdot \dot{U}n = \dot{I}n + \dot{I}ny \end{cases} \quad (2)$$

де $\dot{Y}bb, \dot{Y}nb, \dot{Y}bn, \dot{Y}nn$ – відповідні субматриці загальної матриці провідностей \dot{Y} ;
 $\dot{I}b, \dot{I}n, \dot{I}by, \dot{I}ny$ – відповідні струмові навантаження та струми в поперечних провідностях.

Розглядаємо друге рівняння системи (2). Визначимо вектор невідомих $\dot{U}n$

$$\dot{U}n = -\dot{Y}nn^{-1} \cdot \dot{Y}nb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}nn^{-1} \cdot \dot{I}n + \dot{Y}nn \cdot \dot{I}y$$

Якщо позначити $\dot{U}o = -\dot{Z}nn \cdot \dot{Y}nb \cdot \dot{U}b = -\dot{Z}nn \cdot \dot{U}nn \cdot \dot{I}nb$, а $\dot{Z}nn = \dot{Y}nn^{-1}$, то $\dot{U}n$ можна виразити наступним чином (закон Ома в матричній формі):

$$\dot{U}n = \dot{U}o + \dot{Z} \cdot (\dot{I}n + \dot{I}y) \quad (3)$$

Підставляємо (3) в перше рівняння системи (2):

$$\begin{aligned} \dot{Y}bb \cdot \dot{U}bb + \dot{Y}bn \cdot (\dot{U}o + \dot{Z}nn \cdot (\dot{I}n + \dot{I}y)) &= \dot{I}b + \dot{I}by \\ (\dot{Y}bb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}bn \cdot \dot{U}o) + \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \dot{I}n + \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \dot{I}y &= \dot{I}b + \dot{I}by \end{aligned}$$

Домножимо отриманий вираз на вектор-строку спряжених напруг $\dot{U}b$, що дає змогу виділити значення потоків і складові втрат [2]:

$$\dot{U}b \cdot (\dot{Y}bb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}bn \cdot \dot{U}o) + \dot{U}b \cdot \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \dot{I}n + \dot{U}b \cdot \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \dot{I}y + \dot{U}b \cdot \dot{I}b + \dot{U}b \cdot \dot{I}by = \dot{S}bs$$

Виберемо наступні позначення:

$\dot{S}bs$ – сумарний незбалансований потік потужності в БП з зовнішніх мережевих джерел

$\dot{S}b = \dot{U}b \cdot \dot{I}b$ – власне навантаження БП (постійна величина в балансі);

$\dot{S}bn = \dot{U}b \cdot \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \dot{I}n$ – потік потужності (що забезпечується БП), який визначається струмами навантаження, конфігурацією та параметрами мережі, що живиться;

$\dot{S}by = \dot{U}b \cdot \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \dot{I}y$ – потік потужності (що забезпечується БП), який визначається струмами в поперечних провідностях мережі, що живиться згідно її параметрам та конфігурації;

$d\dot{S}by = \dot{U}b \cdot \dot{U}b \cdot \dot{Y}b = U^2 \cdot \dot{Y}b$ – втрати в поперечних провідностях БП (постійна величина);

$d\dot{S}bk = \dot{U}b \cdot (\dot{Y}bb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}bn \cdot \dot{U}o)$ – власні втрати від контурних перетоків ($\dot{I}n \neq 0, \dot{I}y \neq 0$);

Таким чином, баланс потужностей з першого рівняння системи (2) згідно прийнятих позначень має вигляд:

$$\dot{S}bn + \dot{S}by = \dot{S}bs - \dot{S}b - \dot{S}by + d\dot{S}bk \quad (4)$$

Виконаємо аналогічні перетворення з рівнянням (3), попередньо помножив його на вектор-строку струмів $(\dot{I}n + \dot{I}y)$:

$$\left(\overline{\hat{I}n + \hat{I}y}\right) \cdot \dot{U}n = \left(\overline{\hat{I}n + \hat{I}y}\right) \cdot \dot{U}o + \left(\overline{\hat{I}n + \hat{I}y}\right) \cdot \dot{Z}nn(\hat{I}n + \hat{I}y)$$

Розкривши дужки та використовуючи наступні позначення, маємо:

$\dot{S}on = \overline{\hat{I}n} \cdot \dot{U}o$ – сумарний потік потужності в мережу, що живиться, який покриває навантаження;

$\dot{S}oy = \overline{\hat{I}y} \cdot \dot{U}o$ – сумарний потік потужності в мережу, що живиться, який покриває втрати в її поперечній провідності;

$d\dot{S}nn = \overline{\hat{I}n} \cdot \dot{Z}nn \cdot \hat{I}n$ – власні втрати при електрозабезпеченні тільки навантажень;

$d\dot{S}yy = \overline{\hat{I}y} \cdot \dot{Z}nn \cdot \hat{I}y$ – власні втрати на забезпечення струмів в поперечних провідностях вузлів електромережі;

$d\dot{S}ny = \overline{\hat{I}n} \cdot \dot{Z}nn \cdot \hat{I}y$ - втрати взаємодії струмів $\hat{I}n, \hat{I}y$;

$d\dot{S}yn = \overline{\hat{I}y} \cdot \dot{Z}nn \cdot \hat{I}n$ – втрати взаємодії струмів $\hat{I}y, \hat{I}n$;

$\dot{S}n = \overline{\hat{I}n} \cdot \dot{U}n$ – кінцева споживча потужність навантажень;

$\dot{S}y = \overline{\hat{I}y} \cdot \dot{U}n$ – кінцеві втрати в поперечних провідностях вузлів.

В прийнятих позначеннях використовується термін «власні втрати» та «втрати взаємодії», що пояснюється на прикладі формул розрахунку втрат на лінії, де одночасно є струми трьох джерел.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S} &= (\hat{I}k + \hat{I}n + \hat{I}y) \cdot (\hat{I}k + \hat{I}n + \hat{I}y) \cdot \dot{Z} = \\ &= (\hat{I}k^2 + \hat{I}n^2 + \hat{I}y^2 + \hat{I}k\hat{I}n + \hat{I}k\hat{I}y + \hat{I}n\hat{I}k + \hat{I}n\hat{I}y + \hat{I}y\hat{I}k + \hat{I}y\hat{I}n) \cdot \dot{Z} \end{aligned}$$

Не треба пояснювати які складові втрат є власними, а які втратами взаємодії, відмітимо тільки, що останні можуть бути від'ємними, що свідчить про «корисну» взаємодію, яка зменшує сумарні втрати. Таким чином, маємо баланс потужностей другого рівняння системи (2).

$$\dot{S}on + \dot{S}oy = d\dot{S}nn + d\dot{S}yy + d\dot{S}ny + d\dot{S}yn + \dot{S}n + \dot{S}y \quad (5)$$

Порівнявши вирази (4) і (5) та звернувши увагу на відсутність втрат взаємодії з контурними струмами, можна стверджувати, що ці складові втрат можуть розраховуватися (без деталізації) згідно балансу:

$$d\dot{S}kny = (\dot{S}bn + \dot{S}by) - (\dot{S}on + \dot{S}oy) = \dot{S}bo - \dot{S}os \quad (6)$$

Загальне балансне рівняння (4,5,6) ілюструється на рис.1, об'єднуючи всі попередні викладки та представляє їх графічне тлумачення.

$$\frac{\overline{\hat{U}b} \cdot \hat{I}b}{\dot{S}b} + \frac{\overline{\hat{U}}^2 \cdot \dot{Y}b}{d\dot{S}by} + \frac{\overline{\hat{U}b} \cdot (\dot{Y}bb \cdot \dot{U}b + \dot{Y}bn \cdot \dot{U}o)}{d\dot{S}bk} + \frac{\overline{\hat{U}b} \cdot \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \hat{I}n}{\dot{S}bn} + \frac{\overline{\hat{U}b} \cdot \dot{Y}bn \cdot \dot{Z}nn \cdot \hat{I}y}{\dot{S}by}$$

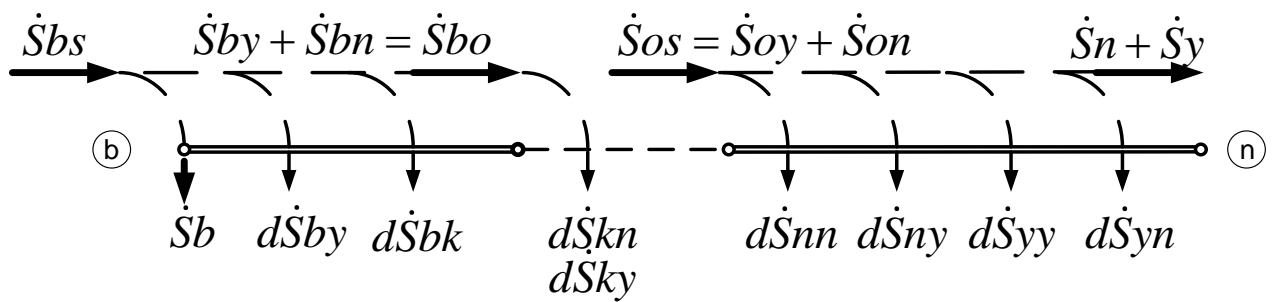


Рисунок 1 – Балансна структура потоків потужностей та класифікація втрат в енергосистемі

$$d\dot{S}_{kn} = \dot{S}_{bn} - \dot{S}_{on}; \quad d\dot{S}_{ky} = \dot{S}_{by} - \dot{S}_{oy}; \quad d\dot{S}_{kny} = d\dot{S}_{kn} + d\dot{S}_{ky}$$

\dot{S}_{bs} – вхідна сумарна потужність усіх балансуючих вузлів;

\dot{S}_b – вузлова потужність балансуючих вузлів БП;

\dot{S}_{bo} – вихідний балансний потік в моделі першого рівня;

\dot{S}_{by} – компонента \dot{S}_{bo} для навантажень від поперечних провідностей \dot{S}_y ;

\dot{S}_{bn} – компонента \dot{S}_o від заданих навантажень \dot{S}_n ;

$d\dot{S}_{bk}$ – власні втрати від контурних струмів.

$d\dot{S}_{ko}$ – втрати взаємодії контурних струмів з навантажувальними і зарядними потоками $\hat{I}k \cdot (\hat{I}n + \hat{I}y)$ і $\hat{I}k \cdot (\hat{I}n + \hat{I}y)$;

\dot{S}_{os} – вхідний мережевий потік в моделі другого рівня;

\dot{S}_n – вихідний мережевий потік заданих навантажень \dot{S}_n ;

\dot{S}_y – вихідний мережевий потік зарядної потужності \dot{S}_y ;

$d\dot{S}_{nn}$ – власні (навантажувальні) втрати від заданих навантажень $\hat{I}k^2, \hat{I}n^2, \hat{I}y^2$

$d\dot{S}_{yy}$ – власні (в поперечній провідності) втрати $\hat{I}k^2, \hat{I}n^2, \hat{I}y^2$;

$d\dot{S}_{ny}, d\dot{S}_{yn}$ – втрати взаємодії заданих навантажень і зарядних потужностей $(\hat{I}k\hat{I}n + \hat{I}k\hat{I}y + \hat{I}n\hat{I}k + \hat{I}n\hat{I}y + \hat{I}y\hat{I}k + \hat{I}y\hat{I}n)$;

Схему рис. 1 можна трактувати як системний еквівалент діючого режиму по інтегральним потокам потужностей та втратами, що ними спричиняються. В схемі виділені дві складові: живильна (b) частина, що визначає режимний зовнішній вплив на систему, та розподільчу мережу, що живиться (n), яка характеризує ефективність електропостачання споживачів. Наприклад, системний еквівалент режиму для аналізу адресності втрат змушує звернути увагу й чисельно оцінити, що втрати $d\dot{S}_{by}, d\dot{S}_{bk}, d\dot{S}_{kn}, d\dot{S}_{ky}$ повністю не можуть бути віднесені на рахунок споживачів, оскільки вони є результатом регулювання напруг в системі, втрати $d\dot{S}_{ny}, d\dot{S}_{yn}$ відносяться частково, але втрати $d\dot{S}_{nn}$ треба адресувати споживачам електроенергії. Подальший чисельний аналіз потребує аналогічних повузлових еквівалентних рішень.

На рис. 2 наведений ілюстративний приклад з двома балансуєчими вузлами (1,2) та трьома навантажувальними (3,4,5). Задані необхідні параметри та режимні навантаження. Для скорочення запису їхня реактивна (уявна) складова записана у дужках, наприклад, вузол 5 має навантаження $(30-j30)$ Мва та еквівалентний шунт $(1000+j1000)$ мкСм. Трансформаторний зв'язок 1-5 регулюється $k_{mp}=(2+j0,5)$ та має опір $R=(10+j50)$ Ом, лінія 3-4 має опір $(15+j10)$ Ом та поперечну провідність $(100+j1000)$ мкСм тощо. Відмітимо, що в прикладі діють всі складові потоків: $\dot{I}k$ – спричиняється різними напругами БП та різними k_{mp} в гілках 1-5, 2-5; $\dot{I}n$ – створюється навантаженнями вузлів 3,4,5; $\dot{I}y$ – є причиною поперечних провідностей та вузлових шунтів.

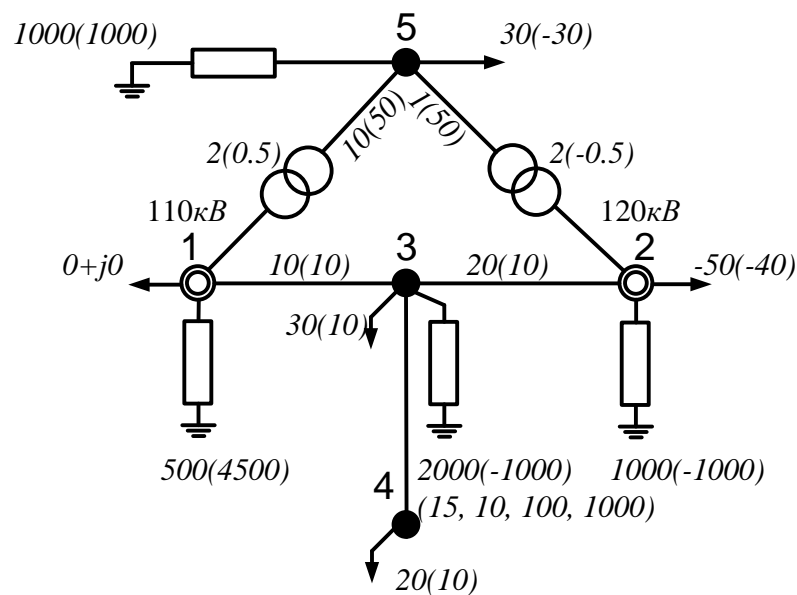


Рисунок 2 – Контрольний приклад для розрахунку балансних потоків та класифікації втрат

Розрахунок контрольного прикладу виконано за допомогою програмного комплексу Z_REGIM, що реалізує наведений вище алгоритм класифікації втрат. Результати розрахунку зображені на рис.3.

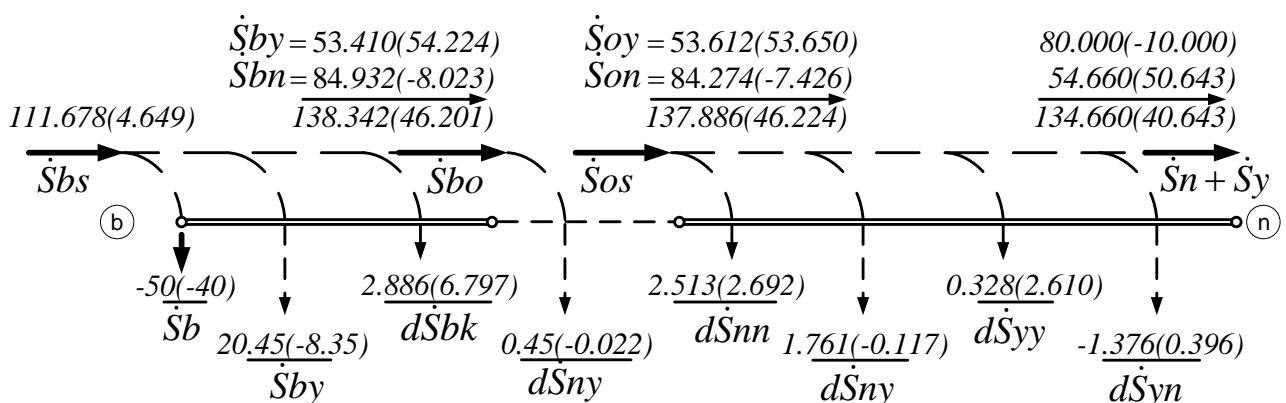


Рисунок 3 – Результати розрахунку контрольного ілюстративного прикладу

Сумарне балансне рівняння по активній потужності даного прикладу має вигляд [3]:

$$P_{sb} = P_b + dP_{by} + dP_{bk} + dP_{kny} + dP_{nn} + dP_{ny} + dP_{yy} + dP_{yn} + P_n + P_y$$

$$111,678 = -50,000 + 20,450 + 2,886 + 0,456 + 2,513 + 1,761 + 0,328 - 1,376 + 134,660$$

Оскільки ілюстративний приклад вирішує задачу тільки оцінки достовірності програмного продукту, наведемо ряд розрахунків для реальних електропередавальних організації України. Результати балансового розрахунку активних втрат представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розрахункові баланси втрат активної потужності (МВт) згідно методики в мережах обленерго (режим зимового максимуму 2014р).

Організація	dP_{Σ}	dP_y	dP_{by}	dP_{bk}	dP_{kny}	dP_{nn}	dP_{yy}	dP_{ny}	dP_{yn}
Миколаїв	32,52	7,09	0,96	9,65	-0,91	15,84	0,10	-1,50	1,29
Київобленерго	57,31	10,55	0,80	3,53	-0,16	43,05	0,25	-4,02	3,31
Прикарпаття	18,02	3,7	0,02	1,75	-0,02	12,73	0,03	-0,75	0,56
Черкаси	20,81	4,8	0,02	1,52	-0,26	15,01	0,06	-1,80	1,46
Полтава	16,84	8,77	0	0,22	-0,01	7,98	0,11	-0,74	0,51
Центр ЕС	130,65	13,26	1,40	0,47	-0,88	144,28	33,71	84,27	-145,86

По приведеним результатам можна зробити наступні узагальнені висновки: найбільша частка втрат (50-90%), звичайно, створюється навантажувальною складовою (dP_{nn}), втрати взаємодії ($dP_{ny} + dP_{yn}$), як правило, мають від'ємне значення за рахунок зустрічних потоків зарядних потужностей ліній, але вплив власних втрат від контурних потоків для різних мереж суттєво відрізняється (від 29,7% (Миколаївобленерго) до 1,3% (Полтавобленерго)), що є наслідком різного рівня транзитних перетікань по замкненим зв'язкам балансуєчих вузлів (конкретний аналіз причин такої розбіжності втрат не є метою даної роботи). Для порівняння наведено результат балансування для центральної енергосистеми.

Висновки: Розроблена якісно нова методика системного еквівалентного балансу потоків потужностей (навантажувальних, зрівнювальних контурних, шунтів на землю і поперечних провідностей) та класифікації власних втрат і втрат взаємодії цих потоків. Методика, що пропонується, оперує сумарними складовими втрат для розрахункової мережевої структури, але формально може бути деталізована для задачі адресації втрат.

Перелік посилань

1. Бессонов Л.А. ТОЭ. Электрические цепи. 10-е изд. / Л.А. Бессонов – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. / Ф.Р. Гантмахер – М.: “Наука”, 1967. – 575 с.
3. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0.38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. ГНД 34.09.104-2003-К.: ГРІФРЕ, 2004. – 164 с.
4. Банін Д.Б. Конспект лекцій з дисципліни «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач» / Д.Б. Банін, М.Д. Банін, А.В. Гнатівський, 2013. – 149 с.