

КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Лежнюк П. Д.¹, Нетребський В. В.¹, Ковальчук О. А.²

¹Вінницький національний технічний університет,

²ТОВ "Енергоінвест" (м. Вінниця)

Запропоновано систему керування режимом електричної мережі на основі методу оптимального розподілу навантаження між джерелами електроенергії з використанням принципу найменшої дії. Він зводиться до розрахунку усталеного режиму схеми електричної мережі за заступною R-схемою, в якій джерела представляються нелінійними економічними опорами.

Постановка проблеми. На сьогодні намітився і реалізується на практиці поступовий перехід від централізованого електропостачання споживачів, основою якої є потужні теплові та атомні електричні станції, до комбінованого, коли частина електроенергії виробляється розосередженими джерелами. Вони працюють безпосередньо в розподільних електричних мережах, розвантажуючи тим самим магістральні мережі. Розподільні електричні мережі (РЕМ) при цьому набувають рис локальної електричної системи (ЛЕС).

В локальних електричних системах (ЛЕС) можуть використовуватися одночасно малі ГЕС, сонячні та вітрові електростанції (СЕС та ВЕС). Оскільки вони відрізняються технічними й економічними характеристиками, то виникають особливості їх використання в ЛЕС. Перші з них за рахунок наявності водосховища можуть приймати участь в регулюванні потужності і працювати за потрібним для ЕЕС і споживачів графіком. СЕС ефективно можуть використовуватися тільки в світлову частину доби, яка змінюється на протязі року. ВЕС на території України в різні сезони мають характерні періоди з мінімальним і максимальним генеруванням. Тобто, СЕС і ВЕС є нестабільними джерелами електроенергії і з цим необхідно рахуватися, формуючи графік покриття навантаження ЛЕС.

Для моделювання оптимальних режимів роботи груп розосереджених джерел електроенергії (РДЕ), об'єднаних функціональними зв'язками можна застосувати низку методів та підходів, що використовуються у традиційній електроенергетиці. Переважна більшість з них призначена для знаходження чисельних розв'язків оптимізаційних задач, що відповідають заданій сукупності вхідних даних. Однак, для задачі, яка розглядається тут, більш перспективним є підхід, що полягає у отриманні аналітичних розв'язків оптимізаційних задач з їх наступним узагальненням на множину характерних станів досліджуваної динамічної системи. Саме такий підхід має переваги з огляду на кінцеву мету даного дослідження – автоматизацію керування функціонуванням динамічної системи, що складається з сукупності різнотипних РДЕ в РЕМ.

Для досягнення суттєвого техніко-економічного ефекту від впровадження РДЕ в електричних мережах доцільно орієнтуватися на створення автоматизованої системи керування (АСК). З погляду на можливості сучасного апаратного і програмного забезпечення така АСК може бути побудована з використанням Smart Grid технологій.

Отже, метою статті є розробка системи оптимального керування РДЕ в локальній електричній системі. Система автоматичного керування побудована на засадах принципу найменшої дії (ПНД).

Математична модель керування

В [1] сформульована задача оптимізації функціонування РДЕ у ЛЕС, яка працює сумісно з ЕЕС (рис.1). Для досягнення максимального прибутку від експлуатації РДЕ на добовому інтервалі часу $[t_0; t_k]$ задача формулюється як мінімізація затрат на електроенергію, взяту з електроенергетичної системи (ЕЕС) (централізоване живлення):

$$\min \left\{ F = \int_{t_0}^{t_k} P_u(t) u(t) dt \right\}, \quad (1)$$

$$\text{за умов } P_u(t) + \sum_{k=1}^n P_k(t) + \sum_{j=1}^m P_j(t) - P_n(t) = 0,$$

де $P_u(t)$ – потужність, що береться з ЕЕС; $P_k(t)$, $P_j(t)$ – потужність відповідно керованих і умовно-керованих РДЕ; $P_n(t)$ – потужність навантаження ЛЕС; $u(t)$ – вартість електроенергії з ЕЕС за багатоступеневим тарифом.

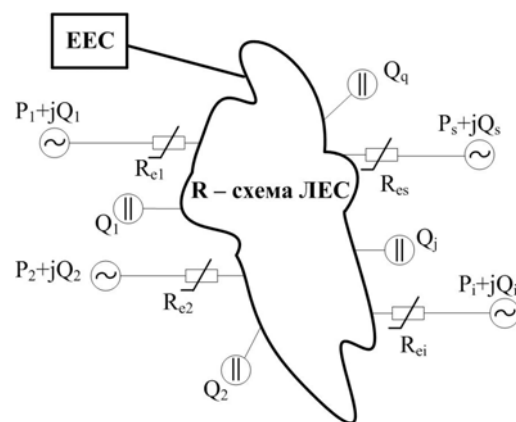


Рисунок 1 – Заступна схема електричної мережі з економічними опорами для комплексної оптимізації

Умови оптимального розподілу навантаження між джерелами електроенергії можна отримати, скориставшись принципом найменшої дії за методикою,

викладеною в [2]. Для цього витрати на виробництво електроенергії і-м джерелом розглядаються як вартість втрат електроенергії в активному опорі R_{ei} за такий же проміжок часу. Тоді, якщо генерування джерела енергії на проміжку часу Δt графіка навантаження є постійним, то отримаємо значення таких економічних активних опорів для кожного джерела:

$$R_{ei} = \frac{U_i^2 u_i}{P_i c}, \quad (2)$$

де $u_i(t)$ – вартість електроенергії і-го РДЕ; c – вартість 1 кВт-год втрат електроенергії.

Розмістивши джерела електричної енергії за розрахованими таким чином опорами, можна замінити визначення мінімуму сумарних витрат на виробництво електроенергії розрахунком економічного режиму ЛЕС за заступною схемою, складеною тільки із активних опорів елементів ЛЕС та економічних опорів R_{ei} . Процес оптимізації навантаження РДЕ може бути автоматизований в обчислювальному середовищі, наприклад TRACE MODE.

Розглянемо випадок роботи s джерел активної і реактивної потужності (це можуть бути електростанції або окремі агрегати) та q джерел реактивної потужності в ЕЕС з сумарним навантаженням $\sum P_n$ і $\sum Q_n$. Цільову функцію представимо як суму затрат на виробництво активної потужності, в тому числі на покриття втрат потужності V в електричних мережах. Тоді задача оптимізації формулюється:

$$Z = \sum_{i=1}^s u_i B_i(P_i) \rightarrow \min \quad (3)$$

за умов балансу потужностей в ЛЕС

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^s P_i - \sum P_n - V &= 0, \\ \sum_{i=1}^s Q_i + \sum_{j=1}^q Q_j - \sum Q_n - \Delta Q &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $B_i(P_i)$ – витратна характеристика джерела електроенергії.

Подамо витрати на виробництво електроенергії як вартість втрат електроенергії в активному опорі R_{ei} за такий же проміжок часу. Тоді при роботі станції з постійним навантаженням на проміжку часу T можна записати:

$$Z = \sum_{i=1}^s u_i B_i(P_i) = \sum_{i=1}^s V_i c + \sum_{j=1}^q V_{Qj} c \rightarrow \min \quad (5)$$

за умов балансу потужностей в системі

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^s P_i - \sum P_n - V &= 0, \\ \sum_{i=1}^s Q_i + \sum_{j=1}^q Q_j - \sum Q_n - \Delta Q &= 0, \end{aligned} \right\}$$

де V_i, V_{Qj} – втрати активної потужності в ЛЕС від генерування джерел відповідно активної і реактивної потужностей.

В (5) витрати, еквівалентні затратам на виробництво електроенергії на і-й станції, визначаються:

$$B_i(P_i)u_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot R_{ei} c.$$

З останнього виразу визначається опір, вартість втрат в якому еквівалентна затратам на виробництво активної потужності на і-й станції, включаючи і активну потужність, що йде на покриття втрат від потоків реактивної потужності від і-ої станції Q_i :

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i)U_i^2 u_i}{(P_i^2 + Q_i^2)c}. \quad (6)$$

Якщо розмістити джерела електричної енергії за опорами, розрахованими за (6), то таким чином оптимізуються витрати на виробництво електроенергії для покриття навантаження ЛЕС $\sum P_n$ і $\sum Q_n$, а також втрат активної потужності від перетоків активної і реактивної потужностей в системі. Якщо при цьому в розрахунковій моделі ЕЕС електричні мережі представлені заступною R -схемою, то оптимізуються також сумарні втрати потужності в ЛЕС. Тобто досягається комплексна оптимізація ЛЕС за активною і реактивною потужностями.

АСК режимами ЛЕС

Добре пристосованою для реалізації на практиці схеми наближення поточного режиму ЕЕС до економічного є адаптивна система керування з еталонною моделлю. Вона апробована стосовно керування нормальними режимами ЕЕС, де в якості еталонної використовується імітаційна модель [3]. На рис. 2 приведена адаптивна система оптимального керування нормальним режимом ЛЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель економічного режиму ЛЕС.

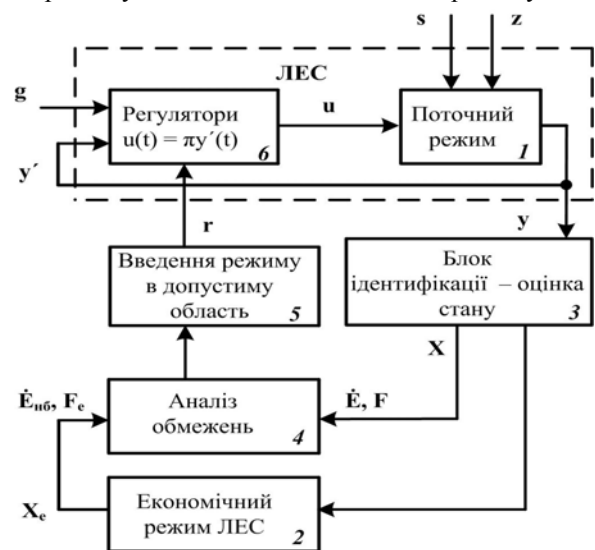


Рисунок 2 – Адаптивна система оптимального керування нормальним режимом ЛЕС

За допомогою цієї системи керування реалізується задача наближення поточного режиму до економі-

чного з врахуванням обмежень.

Об'єкт керування – режим ЛЕС і регулятори утворюють основний контур системи автоматичного керування (САК). На режим ЛЕС постійно діють збурення у вигляді зміни навантаження ВЕС і СЕС s і параметричні збурення – відхилення параметрів ЕЕС від їх номінальних значень z . Значення визначальних параметрів y , склад яких визначається з результатів аналізу на чутливість критерію оптимальності F до керуючих параметрів u , подаються на вхід регуляторів, якими згідно заданих законів керування режим ЛЕС утримується в допустимій області оптимальності. Через регулятори за необхідності можуть здійснюватися прямі керуючі впливи g безпосередньо оперативним персоналом. Контур адаптації (блоки 2–5) керує коефіцієнтами регуляторів. Процес адаптації залежить, як правило, від векторів зовнішніх впливів g , s і від параметричних збурень z , викликаних зміною метеорологічних умов. В блок 3 з бази даних ОІК поступає інформація, необхідна для визначення поточного F і економічного F_e значень критерію оптимальності. Блок 2 є моделлю-еталоном з вектором стану x_e , який визначається в результаті розрахунку усталеного режиму ЛЕС за її заступною R -схемою. В блоці 4 перевіряються умови:

$$\Delta F = |F - F_e| \leq \xi_F,$$

де ξ_F – допустиме відхилення поточних значень критерію оптимальності його оптимального значення.

Обмеження на значення напруги у вузлах мережі контролюються САК і шляхом визначення е.р.с. небалансу $\dot{E}_{нб}$. Введення зрівнювальних е.р.с. \dot{E} зміною коефіцієнтів трансформації компенсує контурні е.р.с. небалансу і наближує режим ЕЕС до економічного. Оптимальні значення коефіцієнтів трансформації визначаються за результатами розв'язання системи контурних рівнянь, що формується з врахуванням результатів розрахунку економічного струморозподілу.

Результати моделювання оптимальних траєкторій зміни станів для об'єднаних груп РДЕ з застосуванням принципу найменшої дії та теорії подібності дозволяють отримати узагальнення, які, в свою чергу, дають можливість сформувати алгоритми оптимального планування сумісної експлуатації таких джерел. Наприклад, для групи малих ГЕС, що працюють у каскаді стало можливим розробити методи та алгоритми оптимізації використання стоків річок. Для сукупності різнотипних РДЕ, що працюють в одній розподільній мережі, наприклад сонячної та гідравлічної електростанції, отримати умови оптимальності та розробити алгоритми узгодження їх функціонування з метою отримання максимального прибутку, враховуючи фактор їх впливу на режими електромереж. Важливою перевагою розроблених математичних методів і алгоритмів є їх зорієнтованість на поступовий перехід до оперативного керування функціонуванням РДЕ в РЕМ з залученням сучасних засобів автоматизації.

Висновки. Визначення оптимального навантаження джерел активної і реактивної потужності зводиться до розрахунку усталеного режиму ЕЕС за її заступною R -схемою. Для оптимізації потоків потуж-

ності в ЕЕС розраховуються відповідні значення коефіцієнтів трансформації.

Адаптивна система керування нормальним режимом ЕЕС, де в якості еталонної моделі використовується модель її економічного режиму, що дозволяє реалізувати задачу наближення поточного режиму до економічного з врахуванням обмежень. Як вихідна інформація використовується база даних ОІК, забезпечує адекватність результатів оптимізації. В оптимальну область режим вводиться відповідною корекцією коефіцієнтів трансформації трансформаторів, автотрансформаторів та лінійних регуляторів.

Список використаних джерел

1. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Ковальчук О. А. // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Ч. 1. – 2011. – С. 48–55.
2. Лежнюк П. Д. Принцип найменшої дії в задачах оптимізації електроенергетичних систем / Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Нетребський В. В. // Технічна електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 35–41.
3. Лежнюк П. Д. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Оболонский Д. И // Электричество. – 2007. – №11. – С. 2–8.

Анотація

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Лежнюк П. Д., Нетребский В., Ковальчук А.

Предложена система управления на основе метода оптимального распределения нагрузки между источниками электроэнергии с использованием принципа наименьшего действия. Он сводится к расчету установившегося режима схемы электрической сети по её R – схеме замещения, в которой источники представлены нелинейными экономическими сопротивлениями.

Abstract

COMPLEX OPTIMIZATION OF PARTITION OF LOAD BETWEEN SOURCES OF ELECTRIC POWER IN DISTRIBUTIVE NETWORKS

P. Lezhnyuk, V. Netrebskyj, O. Kovalchuk

Control system is offered on the basis of method of optimal partition of load between the sources of electric power with the use of principle of the least action. He is taken to the calculation of the set mode of chart of electric network on her R -chart substitution, in which sources by nonlinear economic resistance.