

УДК 621.365

І.В. Жежеленко, д-р. техн. наук

(Україна, м. Маріуполь, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський технічний університет»)

Ю.А. Папайка, О.Г. Лисенко, канд. техн. наук

(Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДЕКСУ НАДІЙНОСТІ

Аннотація. В статті представлені поняття «індекса надійності», як основного показателя енергетичної ефективності систем електропостачання. Розроблені наукові основи розрахунку даного показателя, ґрунтуючись на показниках економічного розвитку країни.

Получено пригодны для практических целей зависимости индекса надежности и обоснованно минимальные значения резервных мощностей генерирующей энергосистемы. Выполнены расчеты индекса надежности для электрических сетей Украины и сформулированы обобщающие выводы по выполнению необходимых мероприятий для улучшения данного показателя к уровню развитых стран мира.

Выполненный анализ использования индекса надежности для оптимизации состава оборудования энергетических систем и районных подстанций.

Ключевые слова: индекс надежности, система электропостачання, надежность электрооборудования, силовые трансформаторы, кабельные линии.

Анотація. У статті представлено поняття «індексу надійності», як основного показника енергетичної ефективності систем електропостачання. Розроблені наукові основи розрахунку даного показника, ґрунтуючись на показниках економічного розвитку країни.

Отримано придатні для практичних цілей залежності індексу надійності та обґрунтовано мінімальні значення резервних потужностей генеруючої енергосистеми. Виконано розрахунки індексу надійності для електричних мереж України та сформульовано узагальнюючі висновки щодо виконання необхідних заходів для покращення даного показника до рівня розвинених країн світу.

Виконаний аналіз використання індексу надійності для оптимізації складу обладнання енергетичних систем та районних підстанцій.

Ключові слова: індекс надійності, система електропостачання, надійність електрообладнання, силові трансформатори, кабельні лінії.

Abstract. The article presents the concept of "reliability index" as the main indicator of energy efficiency of power supply systems. The scientific basis for calculating this indicator is developed, based on indicators of economic development of the country.

The reliability indexes are suitable for practical purposes and the minimum values of reserve capacities of the generating power system are substantiated. Calculations of the reliability index for electric networks of Ukraine are executed and general conclusions about the implementation of the necessary measures for improving this indicator to the level of the developed countries of the world are formulated.

The analysis of the use of the reliability index for optimization of the equipment of power systems and district substations is carried out.

Keywords: reliability index, power supply system, electrical equipment reliability, power transformers, cable lines.

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними дослідженнями

Реальна ситуація сьогодення української електроенергетики визначається надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %). Порівняно з країнами з розвинутою економікою цей показник набагато більший (для країн Західної Європи втрати складають 4-5 %, США – 6 %). Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги, невирішеністю проблем якості електричної енергії. Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж по цілому ряду показників. Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕП). Вона визнана провідними

світовими вченими та відноситься до числа найважливіших проблем сучасної електроенергетики і є частиною проблеми підвищення енергоефективності електричних мереж.

Очевидно існує досить щільний зв'язок значень втрат електроенергії в електричних мережах різних країн з їх економікою. У країнах з більш розвинутою економікою, як правило, вище технічна культура виробництва, передачі та розподілу електроенергії, використовуються більш сучасні системи управління режимами роботи електричних мереж, контролю й обліку електроенергії, діє чітка нормативно-правова база і система тарифного регулювання.

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний також з невирішеністю таких проблем: низький рівень компенсації реактивної потужності; недостатнє використання засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги; низька якість електричної енергії.

Результати дослідження

Поняття надійності в електроенергетиці є одним з основних, що характеризує енергоефективність виробництва, передачу і розподіл електричної енергії. В різних нормативних документах під надійністю розуміється властивість об'єкта (електроустановки, електроенергетичної станції або її частини) забезпечувати необхідні функції (наприклад, безперебійне електропостачання споживачам у заданому обсязі та потрібній якості), зберігаючи свою працездатність та експлуатаційні показники. У сучасних умовах розділяють поняття надійності на оптовому ринку (системна надійність) і роздрібному ринку (надійність електричної мережі). Надійність як ймовірність бездефіцитної роботи електростанцій характеризується індексом надійності p . У СНД нормується індекс надійності, що дорівнює 0,966. Це значно нижче зарубіжних нормативів.

Забезпечення значень p означає зниження вірогідності обмеження електропостачання, що вимагає додаткових капіталовкладень у підвищення надійності всіх складових енергосистеми (генеруючих потужностей, електричних мереж різних рівнів, автоматичних пристроїв та ін.), а також витрат K на забезпечення резерву генеруючих потужностей $P_{рез}$. Значення K можна представити у вигляді

$$K = P_{рез} \cdot K_{нит}, \quad (1)$$

де $K_{нит}$ – питома вартість одного кіловату установки, що генерує потужність, долл/кВт.

Збиток, що виникає через дефіцит електроенергії при відсутності аварійного резерву

$$Z = P_{рез} T y_a q_{деф}, \quad (2)$$

де y_a – питомий збиток через недостатнє постачання електроенергії споживачу, долл/кВт·ч; $q_{деф}$ – інтегральна ймовірність виникнення дефіциту потужності.

Очевидно,

$$p = 1 - q_{деф}. \quad (3)$$

З виразів для K та Z , враховуючи, що $Z \geq K$, отримаємо [2-4]:

$$q_{деф} > \frac{K_{нит}}{T y_a}, \quad (4)$$

де $T = 8760$ год.

Останній вираз використовується зазвичай з урахуванням коефіцієнта ефективності капітальних вкладів $E_{нит}$ протягом року, а також річних витрат на амортизацію a_0 , ремонтні роботи та обслуговування $\beta_{екон}$. Таким чином,

$$q_{деф} > \frac{K_{нит} (E_{ном} + a_0 + \beta_{екон})}{y_a \cdot T}. \quad (5)$$

Наприклад, при $K_{нит} = 2,75$ долл/кВт, $a_0 + \beta_{екон} = 0,05$ та $y_a = 0,125$ долл/кВт·ч виявляється $q_{деф} \geq 0,04$ та $p = 1 - q = 0,96$. При нормованому значенні $p = 0,96$ можливий дефіцит електроенергії у споживача не більше 35 год/рік.

За кордоном, у деяких країнах, приймають $p \approx 0,999$, тоді дефіцит потужності – не більше 8 год/рік.

Згідно з технічними, енергетичними й економічними особливостями електроенергетики виділили ряд ієрархічних рівнів надійності електропостачання.

Територіальні (регіональні) розподільні мережі 220-150-110-35-10(6) кВ, призначені для забезпечення окремих споживачів, віднесено до 3-го рівня. Для електричних мереж такого рівня ймовірність бездефіцитної роботи споживачів визначена І.М. Марковичем величиною $p = 0,996$. У розрахунках було прийнято наступні показники: питома вартість резервних енергетичних потужностей $K_{num} = 2,75$ долл./кВт, питомий збиток від порушень електропостачання $y_0 = 0,075$ долл./кВт·год.

Як відомо, одним з найважливіших показників енергетичної ефективності є індекс надійності електропостачання p .

В енергосистемах СНД значення індексу надійності знаходиться в діапазоні 0,996. Зарубіжні нормативи надійності, що відповідають сучасному стану енергетики, досить високі: в США – 0,9997, Франції – 0,9997, Нідерландах – 0,9995, Ірландії – 0,9991, Скандинавських країнах – 0,999. Перехід на більш високий рівень надійності потребує витрат $K_{баж}$ у розмірі:

$$K_{баж} = K \left(\frac{\lg p}{\lg p_{баж}} \right)^a, \quad (6)$$

де $K_{баж}$ – капіталовкладення для досягнення бажаного рівня індексу надійності $p_{баж}$; K – капітальні витрати, при яких забезпечується індекс надійності p ; $a > 1$ – показник ступеня.

При $p = 0,996$ і $p_{баж} = 0,9998$ $K_{баж} = K(1,9)^a$. Отже потрібне збільшення витрат у 1,9 рази.

Оціночні розрахунки показали, що для забезпечення більш високого рівня надійності необхідні витрати в розмірі 0,1-0,2 тис. долл./рік на 1 МВт навантаження.

Розглянемо можливість аналітичного визначення оптимального значення резервної потужності на електростанціях, що забезпечує необхідний рівень надійності роботи енергосистеми.

При збільшенні резервної потужності підвищуються витрати на спорудження електростанцій і знижуються витрати (збитки) від ймовірного недопостачання електроенергії споживачам, тобто загальні витрати можна представити у вигляді [4, 6]:

$$Z = EK + a(p_a + p_{m,o} + p_k)K + Y = K(E + (p_a + p_{m,o} + p_k))Y, \quad (7)$$

де E – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень K ; a – коефіцієнт, що враховує частку витрат палива на роботу резервної потужності (може бути прийнятий рівним 1,0-3,0); $p_a, p_{m,o}, p_k$ – частка відрахувань від капітальних витрат на амортизацію, поточний ремонт і обслуговування, капітальний ремонт; Y – збиток від недопостачання електроенергії споживачам.

Враховуючи, що з ростом резервної потужності значення K зростає, а Y знижується, то можна записати:

$$Y = z + \frac{v}{P_{рез}}, \quad (8)$$

де z – складова, що враховує частку шкоди від недопостачання електроенергії споживачам, яка не залежить від значення $P_{рез}$, грн; v – складова збитку, що залежить від зміни $P_{рез}$ грн·кВт.

Підставивши значення збитку в (7), отримаємо:

$$Z = K_{num} P_{рез} (E + a(p_a + p_{m,o} + p_k)) + z + \frac{v}{P_{рез}}, \quad (9)$$

З (9) знайдемо оптимальне значення $P_{рез}$. Для цього візьмемо першу похідну $dZ/dP_{рез}$ і прирівняємо її до нуля:

$$\frac{dZ}{dP_{рез}} = K_{num} (E + a(p_a + p_{m,o} + p_k)) - \frac{v}{P_{рез}^2} = 0.$$

Звідси

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{v}{K_{num}(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k))}} \quad (10)$$

Розглянемо шляхи визначення значення v . Розділимо ліві й праві частини виразів (8) на Y та отримаємо

$$1 = \frac{z}{Y} + \frac{v}{P_{рез}Y} = x_1 + a_1x_2, \quad (11)$$

де $x_1 = \frac{z}{Y}$, $a_1 = \frac{v}{P_{рез}}$, $x_2 = \frac{1}{Y}$, $a_1 = \frac{1-x_1}{x_2}$.

Якщо $x_1 = 1,0$, то $a_1 = 0$, $a_1x_2 = 0$ і $z=Y=P_{рез}Tq_{деф}y_0$, де T – розрахунковий період або період спостереження, приймається рівним числу годин на рік, тобто 8760 годин; $q_{деф}$ – ймовірність дефіциту потужності; y_0 – питомий системний збиток від недопостачання електроенергії споживачам за відсутності аварійного резерву потужності (знаходиться у межах 3-50 долл./кВт).

Якщо $x_1 = 0$, то $a_1 = \frac{1}{x_2}$ та $\frac{v}{P_{рез}} = Y$,

тоді

$$v = P_{рез}Y, \quad (12)$$

Якщо $0 < x_1 < 1$, то $a_1 > 0$ та $\frac{v}{P_{рез}} = (1-x_1)Y$ або $v = (1-x_1)YP_{рез}$.

Підставимо значення v у формулу (10) і отримаємо

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{(1-x_1)P_{рез}^2Tq_{деф}Y_0}{K_{num}(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k))}} \quad (13)$$

Звідси ймовірність дефіциту потужності

$$q_{деф} = \frac{K_{num}(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k))}{(1-x_1)Ty_0} \quad (14)$$

Для забезпечення $q_{деф} = 0,001$ або $p_{баж} = 0,999$ необхідно при $(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k)) = 0,4$; $x_1 = 0,1$; $y_0 = 50$ долл./кВт·год; $T=8760$ годин мати значення K_{num} не більше 1000 долл./кВт.

Оптимізація надійності в промисловому електропостачанні

Для розподільних електричних мереж в якості основних показників надійності також застосовують:

а) ймовірність обмеження навантаження споживачам (порушення електропостачання) порівняно зі значеннями в нормальному режимі;

б) ймовірність неперевикнення середньорічного відносного електропостачання деякого нормованого значення [2, 3, 6].

В якості критерію оптимальності приймають мінімум сумарних економічних затрат:

$$Z_{над} = E_{норм}^{доп} K_{инв}^{над} (\alpha_0 + \beta_{экон}) K_{инв}^{над} + V_{\Sigma} \rightarrow \min, \quad (15)$$

де $E_{норм}^{доп}$ – нормативний коефіцієнт прибутковості інвестицій у надійність; $K_{инв}^{над}$ – сума інвестицій у підвищення надійності; α_0 і $\beta_{экон}$ – коефіцієнти амортизаційних відрахувань та експлуатаційних витрат; V_{Σ} – середньорічне значення збитку від порушень електропостачання.

На рис. 1 показано зміни у витратах та їх складових при змінненні надійності електропостачання.

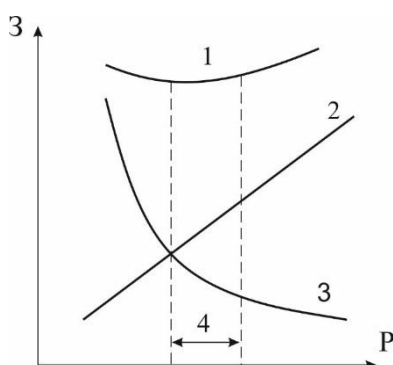


Рис. 1. Графік змін у витратах та їх складових при змінненні надійності електропостачання:
1 – мінімум сумарних економічних витрат; 2 – інвестицій в підвищення надійності;
3 – збитки від порушень в електропостачанні; 4 – зона оптимальних значень

Збільшення надійності системи призводить до зменшення сумарного збитку, але потребує додаткових інвестицій у резервування мережі та експлуатаційні витрати. Сумарні витрати мають достатньо широкую зону оптимальності.

Висновки

Враховуючи показники економічного розвитку України отримано граничні значення індексу надійності на рівні 0,96, що є значно нижчим за показники економічно розвинених країн. Застосування високих капіталовкладень повинно забезпечити підвищення надійності всіх компонентів електроенергетичних систем, що використовують потужність магістральних і розподільних електричних мереж та надходження інвестицій в забезпечення пристроїв протиаварійної автоматики й ін.

Список використаних джерел

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Интеллектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
3. Пивняк Г.Г. Расчеты показателей электромагнитной совместимости: учеб. Пособие / Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А.; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 113 с.
4. Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А., Лысенко О.И. Интергармоник в системах электроснабжения – Научный словарь НГУ, 2017 – №6.
5. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
6. Pivnyak G. G. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise electric power supply / G. G. Pivnyak, I. V. Zhezhelenko, Yu. A. Papaika // Науковий вісник НГУ. - 2016. - № 5. - С. 62 - 66.
7. Pivnyak G.G. Transients in Electric Power Supply Systems: textbook for students of higher educational institutions / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; under the editorship of Academician of National Academy of Sciences of Ukraine Professor G.G. Pivnyak. – Switzerland: TTP. – 2016 – 382 p.p.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.