УДК 621.311.171

ФОРМУВАННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ В УМОВАХ КІБЕРБЕЗПЕКИ

Гриб О. Г., Швець С. В., Бортніков О. В.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

В задачах синтезу енергосистеми для забезпечення надійності в умовах кібербезпеки запропоновані співвідношення для визначення мінімальної та максимальної кратності резервування її елементів

Постановка проблеми. Енергетичні ресурси відіграють провідну роль у сучасній економіці та політиці. Енергетичні компанії мають у своєму розпорядженні величезний перелік конфіденційної інформації, яка в руках зловмисників може привести до зупинки їх діяльності або до катастрофи [1]. Актуальність питань кібербезпеки автоматизованих систем об'єктів електроенергетики з кожним роком зростає. За даними [1] за 2015 р. було зареєстровано 295 інцидентів кібербезпеки на об'єктах критичної інфраструктури США. Не можна не згадати про атаки на Українську енергомережу з використанням шкідливого програмного забезпечення Black Energy. За результати розслідування кібератак пішло відключення напруги на семи 110 кВ і двадцяти трьох 35 кВ підстанціях і відключення енергопостачання в 5 регіонах України на 6 годин. Таким чином, кібербезпека електроенергетичних об'єктів складає основу якісного використання світових енергетичних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розширення цифрових функцій автоматизованих систем управління режимами енергосистем робить їх більш вразливими для кібератак [1]. Подальший розвиток концепцій Smart Grid та мережецентричного управління [2] істотно загострює значення позначених проблем. Застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу елементів енергосистем створює додаткові труднощі в реалізації захисних функцій на апаратному та програмному рівнях. Серед апаратних методів, які забезпечують кіберзахист сучасних енергосистем, відокремлюються методи, суть яких полягає у виділенні критичних функцій управління режимами роботи захистів від пошкодження обладнання [2]. Пропонується запровадження резервування найважливіших елементів системи управління енергосистеми. Даний підхід забезпечить необхідний рівень кібербезпеки енергосистеми при заданих значеннях надійності ключових елементів.

Мета статті. Визначення мінімальної та максимальної кратності резервування в задачах синтезу енергосистеми за критерієм надійності в умовах кібербезпеки.

Основні матеріали дослідження. Будемо розглядати складну систему управління режимами енергосистеми, яка складається з окремих підсистем. Відмова кожної з них приводить до відмови всієї системи управління в цілому. Кожна з підсистем може бути реалізована $u_{i(l_i)}$ способами, які характеризуються різними значеннями техніко-економічних параметрів (надійність, вага, вартість, габарити, енергоспоживання та ін.). Потрібно визначити варіант системи (вибрати варіант реалізації кожної підсистеми), який доставляє екстремум цільової функції надійності P и забезпечує успішне рішення усіх задач управління режимами енергосистеми з ймовірностями не нижче заданих управлінь, при цьому витрати не повинні перевершувати заданої межі. Математична модель цієї задачі має такий вигляд: визначити варіант системи управління енергосистеми v_0, який доставляє максимум функції

$$P(v) = \prod_{j=1}^{n} P_j(u_{j(l_j)}), \qquad (1)$$

при наявності обмежень

$$\begin{gathered} g_p(v) = \sum_{j=1}^{n} g_p(u_{j(l_j)}) \le g_p^* \quad (p = 1, \ ..., q), \\ g_p(v) = \sum_{j=1}^{n} g_p(u_{j(l_j)}) \ge g_p^* \quad (p = q+1, \ ..., Q), \\ v \in V, \quad u_{j(l_j)} \in U_j \quad (j = 1, \ ..., n), \end{gathered} \qquad (2)$$

де $U_j = \{u_{j(1)}, ..., u_{j(l_j)}, ..., u_{j(\xi_j)}\}$ $(j = 1, \ ..., n)$ – сукупність елементів різних типів, які можуть бути використані в j-ї підсистемі, кількість елементів у множині U_j рівно ξ_j;

$$V = \prod_{j=1}^{n} U_j, \qquad (3)$$

де V – множина принципово можливих варіантів системи управління режимами енергосистеми;

$P_j(u_{j(l_j)})$ – надійність (імовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі часу) елемента j-ї підсистеми l_j -го типу;

$g_p(u_{j(l_j)})$ – значення р-го обмежуючого фактора для елемента l-го типу j-ї підсистеми;

$g_p(v)$ – кількість p-го обмежуючого фактора, витраченого на всю систему;

g_p^* – максимально можлива кількість p-го обмежуючого фактора для всієї системи в цілому.

Задачі типу (1) – (2) еквівалентні наступній задачі: знайти максимум

$$f(v) = \sum_{j=1}^{n} f_j(u_{j(l_j)}), \quad (4)$$

при наявності (2), де $f_j(u_{j(l_j)}) = \lg P_j(u_{j(l_j)})$. Таким чином, задача оптимального проектування системи управління режимами енергосистеми за критерієм надійності з урахуванням необхідного рівня кібербезпеки звелася до задачі виду (1)-(2), (4). У нашому випадку під резервуванням елементів підсистеми (за умови, що використовувані ресурси вичерпані не повністю) розуміється наступне. Якщо зроблене резервування в j-й підсистемі, і вона містить $\lambda_j + 1$ елементів (λ_j резервних і один основний), то вихід її з ладу відбувається при виході з ладу всіх $\lambda_j + 1$ елементів – так зване "паралельне резервування". Для побудови варіантів підсистем з резервуванням визначимо максимальну $\lambda^*_{j(l_j)}$ та мінімальну $\lambda^{**}_{j(l_j)}$ кратності резервування (відповідно, максимальне та мінімальне можливе число резервних елементів) для l_j -го типу j-ї підсистеми. При цьому будемо використовувати обчислені при реалізації початкової процедури відсівання неконкурентних варіантів постійні для кожної підсистеми величини

$$\Delta g_p^j = g_p^* - g_p(v^p_{V(l)} \setminus U_j); \quad (p = 1, ..., Q; \quad j = 1, ..., n), \quad (5)$$

де $g_p(v^p_{V(l)} \setminus U_j)$ визначається як

$$g_p(v^{p(l_j)} \setminus U_j, u_{j(l_j)}) > g_p^* \quad p = 1, ..., q;$$
$$g_p(v^{p(l_j)} \setminus U_j, u_{j(l_j)}) < g_p^* \quad p = q+1, ..., Q. \quad (6)$$

Максимальна кратність резервування $\lambda^*_{j(l_j)}$ для кожного елемента, що увійшов у множину U'_j, визначається за співвідношенням

$$\lambda^*_{j(l_j)} = \min_{p=1,...,q} \left[\frac{\Delta g_p^j}{g_p(u_{j(l_j)})} - 1 \right], \quad (7)$$

де через $[a]$ позначена ціла частина a.

Аналогічно, мінімальна кратність резервування $\lambda^{**}_{j(l_j)}$ для кожного елемента, що увійшов у множину U'_j, визначається співвідношенням

$$\lambda^{**}_{j(l_j)} = \max_{p=q+1,...,Q} \left[\frac{\Delta g_p^j}{g_p(u_{j(l_j)})} - 1 \right]. \quad (8)$$

Хоча завжди можна прийняти $\lambda^{**}_{j(l_j)} = 0$, але для зменшення множини можливих варіантів системи з резервуванням необхідно отримувати число різних кратностей резервування $\left| \tilde{\lambda}_{j(l_j)} \right| = \lambda^*_{j(l_j)} - \lambda^{**}_{j(l_j)} + 1$ як можна меншим.

Висновки. Сформульовані актуальні проблеми в області кібербезпеки енергосистем, що стає важливим у зв'язку з появою принципово нових – цифрових підстанцій. В рамках подальшої реалізації концепцій Smart Grid та мережецентричного управління, значення позначених проблем суттєво зростає з появою віртуальних електростанцій. Серед апаратних рішень, які забезпечують кіберзахист сучасних енергосистем, запропоновано для їхньої інфраструктури управління вводити резервування ключових елементів з метою підвищення надійності і тим самим, забезпечення необхідного рівня кібербезпеки.

Список використаних джерел

1. SANS-ICS, E-ISAC. TLP: White. Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid [Electronic resource]. – Mode of access: https: // ics. sans. org/media/EISAC_SANS_Ukraine_DUC_5.pdf

2. Sokol Y. I. Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes / Y. I. Sokol, Yu. A. Sirotin, T. S. Iierusalimova, O. G. Gryb, S. V. Shvets, D. A. Gapon // Electrical engineering & electromechanics. – 2017 – n. 3 – pp. 67-71.

Аннотация

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Гриб О. Г., Швец С. В., Бортников А. В.

В задачах синтеза энергосистемы для обеспечения надежности в условиях кибербезопасности предложены соотношения для определения минимальной и максимальной кратности резервирования ее элементов.

Abstract

FORMATION OF THE SYNTHESIS OF THE ENERGY SYSTEM UNDER CONDITIONS OF CYBERSECURITY

O. Gryb, S. Shvets, A. Bortnikov

In the problems of synthesizing the power system to ensure reliability in cybersecurity conditions, the relations are proposed for determining the minimum and maximum multiplicity of reservation of its elements.