

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ МАКРОМОДЕЛЕЙ
ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Стахів П.Г., докт.техн.наук, Козак Ю.Я., канд.техн.наук, Гоголюк О.П., канд.техн.наук
Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.
e-mail: spg@polynet.lviv.ua

Розглянуто проблеми побудови дискретних макромоделей об'єктів ЕЕС на підставі реальних часових характеристик, отриманих за допомогою сучасних систем моніторингу. Описано процедуру побудови таких макромоделей згідно з концепцією "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану з використанням експертного аналізу та розділення змінних. Бібл. 3.

Ключові слова: макромодель, експертний аналіз, оптимізація, електроенергетична система, підстанція.

Протягом останніх років низка класичних математичних моделей типових об'єктів електромеханічних та електроенергетичних систем (ЕЕС) була доповнена дискретними макромоделями у вигляді "чорної скриньки" у формі змінних стану. Як показує досвід побудови математичних макромоделей компонент ЕЕС [1-3], застосування підходу "чорної скриньки" для складних об'єктів – процедура непроста, а отримана в результаті макромодель часто виявляється незадовільною. Макромоделі компонент ЕЕС є досить складними і містять значну кількість (можуть досягати сотні) коефіцієнтів. Це зумовлено, насамперед, великою кількістю вхідних та вихідних затискачів, зокрема внаслідок трифазності. Як уже згадувалося в статті [3], навіть лінійна модель підстанції "Альбертірша" містить 81 невідомий коефіцієнт. В той же час відомо, що обчислювальна складність оптимізаційних алгоритмів різко зростає при збільшенні вимірності функції мети, тому найбільш перспективним способом вирішення згаданої проблеми є зменшення кількості коефіцієнтів, які підлягають одночасній оптимізації. Інший шлях – покращення характеристик використовуваних оптимізаційних алгоритмів за умов великої розмірності оптимізаційної задачі з застосуванням методів її зменшення.

Ще одним аспектом, який зумовлює складність побудови макромоделей об'єктів ЕЕС, є суттєвий взаємний вплив між різними полюсами відповідного багатополосника, який відображає модельований об'єкт. Тобто, якщо на одному з полюсів з'явилося збурення, то на усіх інших полюсах також буде спостерігатися значний відгук на нього. При цьому реакція на усіх полюсах здебільшого може бути різною. При побудові макромоделі такого об'єкта, виходячи з принципу "чорної скриньки", стикаємося зі складною функцією мети, яка має усі можливі непріємні особливості, характерні для задач оптимізаційної побудови макромоделей, а саме: довгі та круті яри невідомої форми, локальні мінімуми тощо. Слід також згадати і про складність проведення експериментів на електроенергетичних об'єктах, яка здебільшого призводить до того, що побудова макромоделі відбувається на основі фактично наявних даних. А, в такому разі, ми не можемо розраховувати на "чисті" перехідні характеристики, в яких збурення подається лише на один із полюсів досліджуваного об'єкта. Такі дані містять здебільшого одночасне збурення, прикладене на усіх полюсах. Крім того, для трифазного об'єкта, якими є елементи ЕЕС, було б добре також мати симетричні експерименти для кожної з фаз, проте така інформація здебільшого відсутня.

Одним із прикладів експериментальних даних, на основі яких можна проводити побудову макромоделей реальних електроенергетичних об'єктів, є інформація про аварії на них, зокрема зареєстровані апаратно-програмними комплексами різного функціонального призначення під загальною назвою "РЕГІНА". Застосування інформаційної технології синхронізованих вимірювань з використанням сигналів GPS відкриває принципово нові можливості для реєстрації динамічних характеристик ОЕС України та побудови макромоделей елементів, що експлуатуються саме в Україні, з перспективою їхньої подальшої адаптації до відповідних програмних комплексів комп'ютерного моделювання режимів і процесів ЕЕС. Використання макромоделей елементів та складових ЕЕС у формі "вхід-вихід", створених на підставі реальних даних, отриманих під час натурних експериментів чи реєстрованих нормальних і аварійних режимів, надає нові можливості для швидкого моделювання ЕЕС у реальному часі [1,3].

Розглянемо засоби у вигляді підходів, методів та алгоритмів, які можна було б застосувати для розв'язання комплексної проблеми оптимізаційної побудови макромоделей складних динамічних об'єктів, зокрема електроенергетичних. Для зручності подальшого викладу будемо розглядати макромоделі у формі дискретних рівнянь стану

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\bar{x}^{(k)} + \mathbf{G}\bar{v}^{(k)} + \Phi(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)}) \\ \bar{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\bar{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\bar{v}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (1)$$

де \bar{x} – внутрішні змінні, що описують стан системи, \bar{v} – зовнішні збурення, що впливають на стан системи, \bar{y} – вихідні величини, тобто реакція модельованого об'єкта; \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{C} , \mathbf{D} – матриці з невідомими коефіцієнтами, які необхідно знайти в процесі побудови макромоделі, $\Phi(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)})$ – деяка вектор-функція, форму і коефіцієнти якої також слід знайти, k – порядковий номер дискрету.

Для трифазних об'єктів введемо також наступні позначення:

$$\bar{v} = \begin{pmatrix} \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \end{pmatrix}, \quad \bar{y} = \begin{pmatrix} \bar{y}_A \\ \bar{y}_B \\ \bar{y}_C \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Тут вектори з індексами відображають відповідно усі вхідні та усі вихідні величини, що відповідають конкретним фазам.

Оскільки основні проблеми пов'язані з великою кількістю коефіцієнтів моделі і складністю відповідної функції мети, то найбільш ефективним буде розбиття процесу побудови макромоделі на етапи. Враховуючи вже розроблені підходи для проведення такого розбиття [1], але не обмежуючись ними, можна запропонувати наступне.

Побудова проміжної моделі, симетричної щодо фаз. Більшість досліджуваних електроенергетичних об'єктів є трифазними, і в певному наближенні будемо їх вважати симетричними щодо фаз. Тобто характеристики об'єкта залишаться практично незмінними, якщо у виразах (2) зробити циклічну заміну змінних

$$\tilde{\bar{v}} = \begin{pmatrix} \bar{v}_C \\ \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \end{pmatrix}, \quad \tilde{\bar{y}} = \begin{pmatrix} \bar{y}_C \\ \bar{y}_A \\ \bar{y}_B \end{pmatrix} \quad \text{або} \quad \tilde{\tilde{\bar{v}}} = \begin{pmatrix} \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \\ \bar{v}_A \end{pmatrix}, \quad \tilde{\tilde{\bar{y}}} = \begin{pmatrix} \bar{y}_B \\ \bar{y}_C \\ \bar{y}_A \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У такому разі ми можемо на проміжному етапі побудувати спрощену симетричну модель для однієї фази у вигляді

$$\begin{cases} \bar{x}_A^{(k+1)} = \mathbf{F}\bar{x}_A^{(k)} + \mathbf{G}\bar{v}^{(k)} + \Phi(\bar{x}_A^{(k)}, \bar{v}^{(k)}) \\ \bar{y}_A^{(k+1)} = \mathbf{C}\bar{x}_A^{(k+1)} + \mathbf{D}\bar{v}^{(k+1)} \end{cases}. \quad (4)$$

У вищенаведеному виразі слід відзначити відсутність індексу при векторі вхідних величин \bar{v} . Це зумовлено тим фактом, що на конкретну вихідну величину можуть впливати збурення на усіх входах.

Модель (4) містить значно менше невідомих коефіцієнтів, ніж загальна модель, тому її ідентифікація буде значно простішою. Крім того, для побудови цієї моделі можна тричі використати кожний з наявних перехідних процесів згідно з циклічною заміною змінних (3). Це дасть змогу зробити задачу побудови спрощеної симетричної моделі більш коректною, а сама модель не буде орієнтована саме на фазу A , а буде відображати усереднені характеристики. В подальшому на основі проміжної моделі (4) можна побудувати і більш точні моделі для кожної фази. Даний вид розбиття має багато спільного з розбиттям по вихідних змінних [1], проте має і вагомий відмінності. По-перше, в розбитті по вихідних змінних передбачається розширення вектора вхідних величин шляхом додавання інших вихідних величин. У нашому випадку це мали б бути вектори \bar{y}_B та \bar{y}_C . І, по-друге, розбиття по вихідних змінних не передбачає потрібного використання наявних перехідних процесів. Вказані особливості, що виникли внаслідок врахування трифазності модельованого об'єкта, роблять пропонований підхід дещо ефективнішим для побудови макромоделей такого виду.

Розбиття з виділенням лінійної підмоделі. Як і для більшості об'єктів, поведінка яких є близькою до лінійної хоча б на частині розглядуваних режимів роботи, для елементів ЕЕС можна запропонувати розбиття процедури оптимізаційної побудови макромоделі на етапи з виділенням лінійної підмоделі. Ідея полягає в побудові лінійної моделі модельованого об'єкта, а потім на її основі побудові уточненої нелінійної моделі. Для елементів ЕЕС лінійний режим роботи або близький до нього є здебільшого номінальним, і тому даний вид розбиття є актуальним в нашому випадку.

Застосування експертного аналізу для вибору оптимальної форми моделі. Найефективнішим і найбільш складним при практичному застосуванні є використання експертного аналізу для вибору оптимальної форми моделі. Суть ідеї полягає в тому, що ми відмовляємося використовувати загальну форму запису макромоделі виду, а натомість робимо поверхневий аналіз можливих взаємозв'язків між величинами в нашому об'єкті моделювання і на основі цього аналізу записуємо більш оптимальну форму представлення конкретної макромоделі. Зауважимо, що тут мова не йде про "білу скриньку", в якій побудова моделі робиться через врахування усіх можливих процесів у досліджуваному об'єкті, а про "сіру скриньку", в якій ми використовуємо інформацію про модельований об'єкт для звуження області пошуку. Таким чином відкидаються групи коефіцієнтів, непридатні конкретному модельованому об'єкту. Це робиться шляхом вибору форми моделі, спираючися на основні закономірності поведінки модельованого об'єкта, яка може містити розклади в ряд чи інші способи апроксимації потенційних нелінійних залежностей, проте є значно простішою за загальну форму.

Підкреслимо одну неочевидну закономірність: чим детальніший аналіз проводиться для вибору форми моделі, тим вона є простішою, оскільки відкидаються ті частини загальної форми, які нетипові для моделювання даного об'єкту. Саме в такому трактуванні слід виконувати підбір оптимальної форми моделі.

Висновки. Незважаючи на складність оптимізаційної побудови математичних макромоделей компонент ЕЕС, зумовлених великою кількістю вхідних та вихідних затискачів та спричиненою цим високою розмірністю оптимізаційної задачі, такі задачі успішно вирішуються з використанням підходів до розбиття процесу побудови макромоделі на етапи. Зокрема, використання пропонованого в даній статті підходу з побудовою проміжної моделі, симетричної щодо фаз, дозволило значно спростити побудову макромоделі підстанції "Альбертірша" на основі перехідних процесів, зібраних системою "Регіна". Зокрема, вдалося знизити обчислювальні витрати на побудову макромоделі з вищою точністю. Ще одним перспективним підходом до побудови макромоделей складних об'єктів, зокрема елементів ЕЕС, є використання експертного аналізу для вибору оптимальної форми моделі, що дозволяє кардинально знизити обчислювальні витрати на їхню побудову, проте вимагає значної участі дослідника та знання основних закономірностей роботи модельованого об'єкта.

1. Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Селепина Й.Р. Вдосконалення алгоритму оптимізації для ідентифікації параметрів макромоделей електромеханічних систем // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Вип. 666. – 2010. – С. 98–102.

2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф. Інформаційне забезпечення задач керування електроенергетичними системами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 1. – С. 13–22.

3. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Гоголюк О.П. Побудова дискретних макромоделей об'єктів електроенергетичних систем на підставі реальних експлуатаційних характеристик // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 77–86.

УДК 621.3.011.72

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ СОЗДАНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Стахів П.Г., докт.техн.наук, **Козак Ю.Я.,** канд.техн.наук, **Гоголюк О.П.,** канд.техн.наук
Национальный университет "Львовская политехника",
ул. С.Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина.
e-mail: spg@polynet.lviv.ua

Рассмотрены проблемы создания дискретных макромоделей объектов ЭЭС на основе реальных временных характеристик, полученных с помощью современных систем мониторинга. Описана процедура создания таких макромоделей согласно концепции «черного ящика» в форме дискретных уравнений состояния с использованием экспертного анализа и разделения переменных. Библи. 3.

Ключевые слова: макромодел, экспертный анализ, оптимизация, электроэнергетическая система, подстанция.

INCREASING OF EFFECTIVENESS OF ALGORITHMS TO CREATE MACROMODELS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS OBJECTS

Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O.
National University "Lvivska Politechnika"
str. S.Bandera, 12, Lviv, 79013, Ukraine.
e-mail: spg@polynet.lviv.ua

In the paper the problems to create discrete macromodels of electric power system objects on the basis of real time characteristics obtained with the help of modern systems of monitoring systems is considered. The procedure of creation of such macromodels using the "black box" conception in the form of discrete state equations with the help of expert analysis and separation of variables is described. References 3.

Key words: macromodel, expert analysis, optimization, electric power system, substation.

1. Stakhiv P., Kozak Yu., Selepyna Yo. Improvement of the optimization algorithm for identification of parameters of electromechanical system parameters // Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politechnika" "Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy". – 2010. – Vyp. 666. – Pp. 98–102. (Ukr)

2. Stohnii B., Kyrylenko O., Butkevych O., Sopol M. Infoware of electric power system control tasks // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2012. – № 1. – Pp. 13–22. (Ukr)

3. Stohnii B., Sopol M., Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Creation of discrete macromodels of electric power systems objects based on actual exploitation characteristics // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – № 2. – Pp. 77–86. (Ukr)

Надійшла 08.02.2014