

УДК 621.311

МОНІТОРИНГ ЗАПАСІВ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ НА БАЗІ ВИМІРІВ ВЕКТОРІВ НАПРУГИ

О.Ф.Буткевич, докт.техн.наук, А.В.Левконюк, О.Б.Рибіна, канд.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Розглянуто питання побудови та використання поліноміальних моделей (ПМ) для класифікації режимів енергосистеми залежно від запасів статичної стійкості. Як вхідні дані для ПМ використовуються виміри векторів напруги. Виконано порівняння ПМ та штучних нейронних мереж за критерієм мінімуму помилок класифікації. Бібл. 5, табл. 1.

Ключові слова: перетин енергосистеми, запас статичної стійкості, поліноміальна модель, вектор напруги.

Забезпечення статичної стійкості режимів електроенергетичних систем (ЕЕС) є однією із основних умов їхнього існування (під ЕЕС розуміємо і об'єднані ЕЕС – ОЕС). Наявність необхідного *запасу статичної стійкості* як певної відстані (з використанням певної метрики) до граничного за статичною стійкістю режиму ЕЕС і є однією з умов існування реальних режимів ЕЕС. Значення таких необхідних запасів встановлюється нормативними документами [3].

Наразі під час *ведення режимів* ОЕС України диспетчерський персонал Національної енергетичної компанії “Укренерго” контролює допустимість завантаження 22 перетинів ОЕС України за поточними значеннями потоку активної потужності (P_j) у кожному такому j -му ($j = \overline{1, 22}$) перетині, керуючися вимогою

$P_j \leq P_{j.m.d.}$, де $P_{j.m.d.}$ – максимально допустима величина потоку активної потужності, визначена для j -го контрольованого перетину. Уразливість такого контролю відома. Тому підвищення надійності визначення допустимості завантаження контрольованих перетинів залишається актуальною задачею, розв'язання якої підвищує надійність функціонування ОЕС. Створення і впровадження в ОЕС України сучасних пристроїв синхронізованого вимірювання модулів та кутів векторів напруги дозволяє використати таку інформацію для розв'язання низки актуальних задач оперативного керування, зокрема, і зазначеної вище задачі.

Як відомо, вектори напруги є досить інформативними в аспекті оцінювання потоку активної потужності окремої лінії електропередачі (ЛЕП), однак наразі невідомі приклади використання результатів вимірювання модулів та кутів векторів напруги для безпосереднього оцінювання завантаження не окремих ЛЕП, а перетинів ЕЕС. Разом з тим, таку задачу можна розв'язувати як задачу класифікації режимів, розділяючи їхні образи на класи – залежно від *інтервальних* значень запасів статичної стійкості режимів ЕЕС, які встановлюються (задаються) на етапі формування навчальних вибірок даних. Коефіцієнти (K_c) зазначених *інтервальних* запасів, які вказують на належність режиму до відповідного класу (значення, якого набуває індекс “ c ”, є “номером” певного класу), за нормальної схеми ЕЕС можуть бути, наприклад, такими: $K_1 \geq 0,4$, $0,35 \leq K_2 < 0,4$, $0,30 \leq K_3 < 0,35$, $0,25 \leq K_4 < 0,3$, $0,2 \leq K_5 < 0,25$, $0,15 \leq K_6 < 0,2$, $0,10 \leq K_7 < 0,15$, $0,05 \leq K_8 < 0,10$, хоча в практичному аспекті, беручи до уваги вимоги [3], потреба у такій кількості класів у більшості випадків, очевидно, і не виникатиме. Виходимо із припущення, що простір, де зазначені образи режимів можна розділити на класи, утворено певними модулями та кутами векторів напруги. *Лінійне* розділення образів режимів у зазначеному просторі априорі неможливе, проте можна знайти зазначені розділювальні гіперповерхні навіть у разі їхньої суттєвої нелінійності (якщо ж побудова таких гіперповерхонь виявилася б проблематичною, то, згідно з теоремою [4], для збільшення ймовірності *лінійного* розділення образів довелося б застосувати нелінійне перетворення вхідних даних і перейти до простору більшої вимірності). Якщо виходити із відомої теореми Вейерштрасса про апроксимування та її узагальнення [5], то зазначені розділювальні нелінійні поверхні можна рівномірно наблизити послідовністю нелінійних елементів (поліномів). Отже, задача зводиться до побудови поліноміальних моделей (ПМ), які повинні забезпечити апроксимацію розділювальних гіперповерхонь. Моделі класифікації режимів ЕЕС можна реалізувати і на нейромережевому базисі – у вигляді штучних нейронних мереж (ШНМ). Точки розділювальних гіперповерхонь повинні задовольняти умовам

$$Y(X) = 0, \quad \Phi(Z) = 0, \quad (1,2)$$

де $Y(X)$ – модель для визначення допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕЕС, X – вектор вхідних змінних такої моделі; (2) – система рівнянь усталеного режиму ЕЕС, а Z – вектор її режимних параметрів, причому $X \subset Z$.

Побудова зазначених моделей класифікації режимів ЕЕС у разі “*навчання з учителем*” потребує навчальних вибірок даних $\{(V_j, c_j)\}_{j=1}^N$, кожний вектор яких (V_j) – точка вибірки – є представником певного режиму і утворюється модулями та кутами векторів напруги окремих вузлів схеми ЕЕС, а c_j – ознака (як бажана реакція моделі), що вказує на належність j -ї точки вибірки (образу відповідного режиму) до певного класу, який характеризується відповідним *інтервальним* коефіцієнтом запасу. Формування вибірок даних та побудова моделей підпорядковується задачі забезпечення точності класифікації режимів ЕЕС. Одна із особливостей даної задачі полягає у тому, що множини реальних режимів ЕЕС є континуумом. Наявний досвід

побудови ПМ з використанням алгоритмів методу групового урахування аргументів (МГУА) для розв'язання даної задачі свідчить, що можна забезпечити необхідну точність класифікації режимів [2].

Разом з тим, хоча існує структурна подібність МГУА та ШНМ, а МГУА використовують для конструювання поліноміальних ШНМ, у загальному випадку ШНМ видаються *гнучкішими*, маючи більші можливості налаштування для урахування особливостей конкретних задач (насамперед, завдяки можливості вибору та налаштування як архітектури, так і функцій активації). Тому порівняння ПМ та ШНМ за критерієм точності класифікації режимів ЕЕС за запасами статичної стійкості є доцільним в аспекті удосконалення інструментарію розв'язання зазначеної задачі. Для порівняння використовувалися ПМ, побудовані для перетину тестової 6-машинної схеми ЕЕС (усі дані щодо цієї ЕЕС наведено в [1]) та двох контрольованих перетинів ОЕС України ("ПУ АЕС-Дніпро" та "Захід-Вінниця"); відповідні ШНМ реалізовано з використанням засобів *Matlab R2011a*, *Neural Network Pattern Recognition Tool*. Нижче у таблиці наведено деякі результати такого порівняння, вони характерні для одержаних результатів у цілому (кількість зазначених помилок, яких припустилися моделі, стосуються тестових вибірок); в таблиці навчальні та тестові вибірки позначено відповідно *н.в.* та *т.в.*

Перетин	Кількість точок вибірки	Кількість елементів у векторі вибірки	Кількість помилок, зроблених ПМ	Кількість помилок, зроблених ШНМ
тестової схеми	<i>н.в.</i> – 249; <i>т.в.</i> – 83	14	1	3
"ПУ АЕС-Дніпро"	<i>н.в.</i> – 974; <i>т.в.</i> – 30	38	0	0
"Захід-Вінниця"	<i>н.в.</i> – 2495; <i>т.в.</i> – 264	42	0	0

Висновок. За критерієм мінімуму зроблених помилок класифікації режимів ЕЕС на тестових вибірках ПМ не поступають ШНМ, що є додатковим свідченням доцільності застосування ПМ у формі поліному Колмогорова-Габоря для розв'язання зазначеної задачі.

1. *Буткевич О.Ф.* Проблемно-орієнтований моніторинг режимів ОЕС України // Техн. електродинаміка. – 2007. – №5. – С. 39–52.
2. *Буткевич О.Ф., Левконюк А.В., Зорін С.В., Буланая В.С.* Про використання синхронізованих вимірів кутів напруги з об'єктів ОЕС України при визначенні допустимості її поточних режимів за запасами статичної стійкості // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 51–58.
3. *ГКД 34.20.575-2002.* Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. – К.: "КВІЦ", 2002. – 48 с.
4. *Cover T.M.* Geometrical and statistical properties of system of linear inequalities with applications in pattern recognition // IEEE Trans. on Electron. Computers. – 1965. – Vol. EC-14. – Pp. 326–334.
5. *Stone M.N.* The generalized Weierstrass approximation theorem // Math. Mag. – 1948. – Vol. 21. – Pp. 167–183, 237–254.

УДК 621.311

Моніторинг запасов статической устойчивости энергосистемы на базе измерений векторов напряжения
А.Ф.Буткевич, А.В.Левконюк, О.Б.Рыбина,

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Перемоги, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Рассмотрены вопросы построения и использования полиномиальных моделей (ПМ) для классификации режимов энергосистемы в зависимости от запасов статической устойчивости. В качестве входных данных для ПМ используются измерения векторов напряжения. Выполнено сравнение ПМ и искусственных нейронных сетей по критерию минимума ошибок классификации. Библи. 5, табл. 1.

Ключевые слова: сечение энергосистемы, запас статической устойчивости, полиномиальная модель, вектор напряжения.

Power system steady-state stability margins' monitoring based on voltage phasors' measurements

O.F.Butkevych, A.V.Levkoniuk, O.B.Rybina,
Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,
Peremohy av., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

The questions of construction and application of polynomial models (PM) for classification of power system operational conditions in depending on steady-state stability margins are considered. The measurements of voltage phasors are used as input data to PM. A comparison of PM and artificial neural networks by use a criterion of classification errors was realized. References 5, table 1.

Key words: cutsets of power system, steady-state stability margin, polynomial model, voltage phasor.

1. *Butkevych O.F.* Problem-oriented monitoring of Ukrainian IPS operational conditions // Tekhnichna elektrodynamika. – 2007. – №5. – Pp. 39–52. (Ukr)
2. *Butkevych O.F., Levkoniuk A.V., Zorin E.V., Bulanaia V.S.* About the use of synchronized measurements of voltage angels from the objects of Interconnected Power System of Ukraine in the time of determination of an admissibility of its operational conditions in depending on steady-state stability margins // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – № 6. – Pp. 51–58. (Ukr)
3. *Industry Guidance Documents 34.20.575-2002.* Power system Stability. The guidelines.– Kyiv: KVIC, 2002. – 48 p. (Ukr)
4. *Cover T.M.* Geometrical and statistical properties of system of linear inequalities with applications in pattern recognition // IEEE Trans. on Electron. Computers. – 1965. – Vol. EC-14. – Pp. 326–334.
5. *Stone M.N.* The generalized Weierstrass approximation theorem // Math. Mag. – 1948. – Vol. 21. – Pp. 167–183, 237–254.

Надійшла 31.01.2012
 Received 31.01.2012