«Релейная защита и автоматика энергосистем 2017»
25 – 28 апреля 2017 г., Санкт-Петербург

АДАПТИВНЫЙ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИГНАЛОВ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ СЕТЕЙ С FACTS И HVDC

В.И. Антонов[1,2], В.А. Наумов[1,2], Н.Г. Иванов[1,2], А.В. Солдатов[2] ,[1]Чувашский государственный университет, [2]ООО НПП «ЭКРА», Россия, ivanov ng@ekra.ru

Ключевые слова:Адаптивный структурный анализ, структурная модель, метод наименьших квадратов, минимальная норма, общая задача метода наименьших квадратов, релейная защита, цифровая обработка сигналов, гибкие системы электропередачи, системы электропередачи постоянного тока

1 ВВЕДЕНИЕ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ)

Сигналы аварийного процесса в сетях с гибкими системами электропередачи (FACTS) и системами электропередачи постоянного тока (HVDC) содержат значительное число свободных составляющих, уровни которых могут быть сравнимы или даже превышать уровни основной гармоники [1]. Короткое замыкание в сети, отягощенное аварийно-ошибочной коммутацией на преобразовательной станции HVDC, приводит к ситуации, когда в прилегающих к станции неповрежденных ЛЭП на начальном отрезке аварийного процесса основная гармоника тока практически неразличима на фоне свободных составляющих (рис. 1) [2]. Классические фильтры основной гармоники [3] в принципе не предназначены для обработки таких сигналов и имеют значительную погрешность, обусловливая ухудшение селективности и быстродействия защит. Известны неоднократные случаи излишней работы релейной защиты вблизи систем HVDC [2].

В работах [4, 5] с целью обеспечения селективности релейной защиты линий, примыкающих к преобразовательным станциям HVDC, было предложено отказаться от дистанционной защиты в пользу дифференциальной. Однако такое решение сопряжено с опасностью нарушения работоспособности защит при потере каналов связи между полукомплектами защиты.

Для сохранения возможности применения релейной защиты с относительной селективностью необходимо, чтобы применяемые алгоритмы обработки сигналов обладали способностью распознавания сигналов, искаженных свободными составляющими значительного уровня. Одним из перспективных методов распознавания таких сигналов является адаптивный структурный анализ [6].

В настоящей работе рассматриваются методы настройки адаптивных структурных моделей при распознавании сигналов аварийных режимов сетей с FACTS и HVDC.

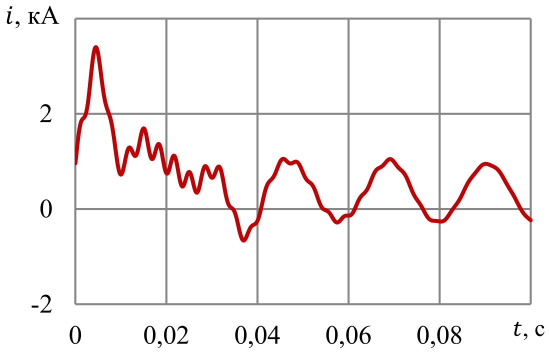


Рис. 1: Кривая фазного тока в неповрежденной ЛЭП при коротком замыкании в сети, отягощенном аварийно-ошибочной коммутацией на преобразовательной станции HVDC

2 АДАПТИВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ

Ключевая идея структурного анализа заключается в аппроксимации сигнала электрической сети совокупностью собственных мод эквивалентной линейной системы (модели). Подобность модели и сигнала аварийного режима обеспечивается инерционностью процессов регулирования в электрической сети, благодаря чему в начале режима короткого замыкания сеть проявляет себя как линейная инвариантная во времени система. Поэтому реакция электрической сети на короткое замыкание представляет собой линейную комбинацию собственных мод, размер базиса которых определяется порядком ее характеристического уравнения [7].

Инструментом распознавания структуры сигнала в адаптивном структурном анализе является цифровая структурная модель [8]

$$a_0\hat{x}(k) = -\sum_{m=1}^{M} a_m x(k-m),\ k \geq M, \tag{1}$$

где $a_0\hat{x}(k)$ – взвешенная с коэффициентом a_0 оценка текущего отсчета сигнала $x(k)$, a_m – искомые коэффициенты модели, M – порядок структурной модели. Коэффициент a_0 выбирается произвольным, обычно $a_0 = 1$.

По коэффициентам a_m структурной модели (1) формируется характеристический полином

$$P_M(\underline{\zeta}) = \sum_{m=0}^{M} a_m \underline{\zeta}^{-m},$$

корни которого определяют частоты ω_i и коэффициенты затухания α_i слагаемых сигнала

$$(\alpha_i + j\omega_i)T_s = \ln \underline{\zeta}_i.$$

Здесь T_s – интервал дискретизации.

В терминах матричной алгебры модель (1) может быть представлена как

$$a_0\hat{x}(k) = -\mathbf{a}^T\mathbf{x}(k-1), \tag{2}$$

где

$$\mathbf{a} = [a_M, a_{M-1}, \cdots, a_1]^T \tag{3}$$

и

$$\mathbf{x}(k-1) = [x(k-M), x(k-M+1), \cdots, x(k-1)]^T - \tag{4}$$

$(M \times 1)$-векторы параметров модели и наблюдаемых отсчетов сигнала соответственно.

Вектор коэффициентов (3) обычно ищут как решение системы уравнений

$$\mathbf{Xa} = \mathbf{b}, \tag{5}$$

полученной в предположении, что модель хорошо описывает сигнал, и отсчеты сигнала и модели равны друг другу: $a_0x(k) - a_0\hat{x}(k) = 0,\ k \geq M$. Траекторная матрица $\mathbf{X}$ и вектор наблюдений $\mathbf{b}$ определяются с помощью вектора отсчетов сигнала (4) следующим образом

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(k-L) \\ \vdots \\ \mathbf{x}^T(k-1) \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{L\times M}, \tag{6}$$

и

$$\mathbf{b} = \mathbf{x}(k),$$

где L – число уравнений.

В идеальном случае, когда сигнал $x(k)$ является результатом вычислительного эксперимента, шум в сигнале представлен лишь ошибкой вычислений и незначителен, в связи с чем он не оказывает существенного влияния на оценку текущего отсчета (2). Поэтому искомые коэффициенты могут быть определены полагая, что число уравнений $L = M$ и матрица $\mathbf{X}$ квадратная невырожденная [9]:

$$\mathbf{a} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{b},$$

Неотъемлемой частью сигналов аварийного процесса является шум. Шум ухудшает разрешающую способность модели (2) и приводит к повышению ее порядка M. В связи с этим всегда подразумевается, что порядок модели M выше порядка M_s сигнала текущего режима. Шум произволен и не может быть учтен моделью, поэтому уравнение (5) не имеет точного решения и должно быть записано как приближенное равенство

$$\mathbf{Xa} \approx \mathbf{b}. \tag{7}$$

Решение системы (7) не может быть единственным, и речь может идти только об отыскании оптимального решения, доставляющего лучшее усредненное приближение структурной модели к сигналу.

Методы настройки структурной модели могут быть объединены в две группы. Первые – винеровская оценка и решение с минимальной нормой – основаны на решении задачи наименьших квадратов. Другие – базовое решение и решение с минимальной нормой –основаны на решении общей задачи наименьших квадратов (в англоязычной литературе Total Least Square solution, TLS-solution).

Метод настройки структурной модели определяет ее разрешающую способность и вычислительную сложность алгоритма обработки сигнала.

3 МЕТОДЫ НАСТОЙКИ АДАПТИВНЫХ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ

3.1 Винеровская оценка

Идея МНК заключается в поиске решения $\mathbf{a}$, обеспечивающего минимизацию критерия наименьших квадратов

$$\min_{\mathbf{a}\in\mathbf{R}^M} \sum_{i=k-L+1}^{k} e^2(i),$$

где

$$e(k) = a_0 x(k) - a_0 \hat{x}(k).$$

В терминах матричной алгебры задача формулируется как задача минимизации квадратичной нормы

$$\min_{\mathbf{a}\in\mathbf{R}^M} \|\mathbf{Xa} - \mathbf{b}\|_2.$$

Винеровская оценка, известная как уравнение Винера–Хопфа, дается в виде [10, 11]

$$\hat{\mathbf{a}}_{LS} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{b}. \tag{8}$$

Как уже отмечалось, из-за шумов в сигнале порядок структурной модели всегда выбирается выше порядка сигнала. Уровень шумов заранее неизвестен, и если он относительно мал, то уравнения в системе (7) теряют независимость и точность решения (8) ухудшается. В предельном случае решение (8) вырождается, придавая системе (7) бесконечное множество решений $\hat{\mathbf{a}}_{LS}$.

Указанный недостаток не позволяет применять винеровскую оценку в алгоритмах распознавания сигналов в релейной защите. Для практического применения необходимы методы настройки, обладающие стабильностью к возмущениям в измерениях.

3.2 Решение МНК с минимальной нормой

Основной недостаток винеровской оценки – вырождение решения – преодолевается в решении с минимальной нормой путем контроля численного ранга r траекторной матрицы $\mathbf{X}$. Для этого используется сингулярное разложение траекторной матрицы [12]

$$\mathbf{X} = \mathbf{U\Sigma V}^T,$$

где $\mathbf{V}$ и $\mathbf{U}$ – унитарные матрицы, образованные левыми и правыми сингулярными векторами соответственно,

$$\mathbf{\Sigma} = \mathrm{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_p) \in \mathbf{R}^{L\times M} -$$

матрица сингулярных чисел σ_i, $p = \min(L, M)$. Численный ранг r определяется из неравенства

$$\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \varepsilon \geq \sigma_{r+1} \geq \dots \geq \sigma_p,$$

где ε – заданный порог доверия к решению.

В формулировании решения с минимальной нормой

$$\hat{\mathbf{a}}_{MN} = \mathbf{X}^+\mathbf{b}, \tag{9}$$

используется псевдообратная матрица

$$\mathbf{X}^+ = \mathbf{V\Sigma}^+\mathbf{U}^T \in \mathbf{R}^{L\times M},-$$

где

$$\mathbf{\Sigma}^+ = \mathrm{diag}(\sigma_1^{-1}, \dots, \sigma_r^{-1}, 0, \dots, 0) \in \mathbf{R}^{L\times M}.$$

В задаче определения частот синусоидальных слагаемых сигнала метод с минимальной нормой впервые был использован в работе [13], в связи с чем в англоязычной литературе по цифровой обработке сигналов этот метод часто называют методом Тафтса–Кумаресана.

3.3 Базовое решение общей задачи МНК

Решения системы (7) по критерию классического МНК основаны на предположении, что траекторная матрица $\mathbf{X}$ задана точно, и шум присутствует лишь в векторе наблюдения $\mathbf{b}$. На практике этот постулат не имеет достаточных оснований, поскольку траекторная матрица (6) также подвержен воздействию шума. Очевидно, что рассчитывать в этом случае на «правильное» решение не приходится.

Этот недостаток устраняется в общей задаче МНК [14]. Идея метода заключается в переходе к решению однородной системы линейных уравнений

$$[\mathbf{X};\ \mathbf{b}][\mathbf{a}^T;\ -1]^T \approx \mathbf{0}.$$

Если траекторная матрица $\mathbf{X}$ имеет полный ранг, то базовое решение общей задачи МНК существует и равно

$$\hat{\mathbf{a}}_{TLS} = -\left[v'_{1,M+1}, \dots, v'_{M,M+1}\right]^T / v'_{M+1,M+1}, \tag{10}$$

где $v'_{i,j}$ – элементы i-ой строки j-ого столбца матрицы $\mathbf{V}'$ сингулярного разложения расширенной матрицы

$$\mathbf{X}' = [\mathbf{X}, \mathbf{b}] = \mathbf{U}'\mathbf{\Sigma}'\mathbf{V}'^{\boldsymbol{T}}.$$

С точки зрения общей теории структурных моделей, повышение их разрешающей способности обеспечивается, главным образом, наращиванием ресурсов фильтра шума [8]. Поэтому порядок структурной модели M всегда намного превосходит совокупный порядок M_s полезных слагаемых распознаваемого сигнала электрической системы. При распознавании сигнала аварийного процесса ранг расширенной матрицы $\mathbf{X}'$ полон из-за влияния шума. Матрица сингулярных чисел не содержит нулевых элементов, однако младшие сингулярные числа, ассоциированные с шумом оказываются близки друг к другу. В таких условиях базовое решение общей задачи МНК теряет уникальность и, как следствие, точность [15].

3.4 Решение общей задачи МНК с минимальной нормой

Недостатки базового решения общей задачи МНК искоренены в решении с минимальной нормой [15, 12]

$$\hat{\mathbf{a}}^T_{TLS-MN} = \frac{\mathbf{G}_s\mathbf{g}_s}{\mathbf{1} - \mathbf{g}_s^T\mathbf{g}_s} = -\frac{\mathbf{G}_n\mathbf{g}_n}{\mathbf{g}_n^T\mathbf{g}_n}. \tag{11}$$

где $\mathbf{G}_s \in \mathbf{R}^{M \times r}$, $\mathbf{G}_n \in \mathbf{R}^{M \times (M-r+1)}$, $\mathbf{g}_s^T \in \mathbf{R}^{1 \times r}$ и $\mathbf{g}_n^T \in \mathbf{R}^{1 \times (M-r+1)}$ –элементы матрицы $\mathbf{V}'$

$$\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_s & \mathbf{G}_n \\ \mathbf{g}_s^T & \mathbf{g}_n^T \end{bmatrix}$$

r – численный ранг расширенной матрицы $\mathbf{X}'$, определяемый из условия

$$\sigma'_1 \geq \dots \geq \sigma'_r > \sigma'_{M+1} + \varepsilon,$$

σ'_i – i-ое сингулярное число расширенной матрицы $\mathbf{X}'$.

3.5 Результаты экспериментов

Возможности рассмотренных методов исследовались при распознавании сигнала, состоящего из основной гармоники, апериодической слагаемой и белого гауссовского шума

$$x(k) = \cos\left(\frac{\pi}{12}k\right) - e^{-\frac{k}{24}} + x_n(k). \tag{12}$$

В эксперименте использовалось 100 различных реализаций сигнала (12) с размером выборки 24 отсчета, порядок структурной модели M изменялся от 3 до 12. Критериями сравнения были среднеквадратическая ошибка оценки частоты основной гармоники

$$\mathrm{MSE}_f = \sum_{i=1}^{100}\left(\widehat{f}_i - 50\right)^2,$$

и среднеквадратическая ошибка оценки коэффициента затухания апериодической слагаемой

$$\mathrm{MSE}_\alpha = \sum_{i=1}^{100}(\widehat{\alpha}_i - 50)^2$$

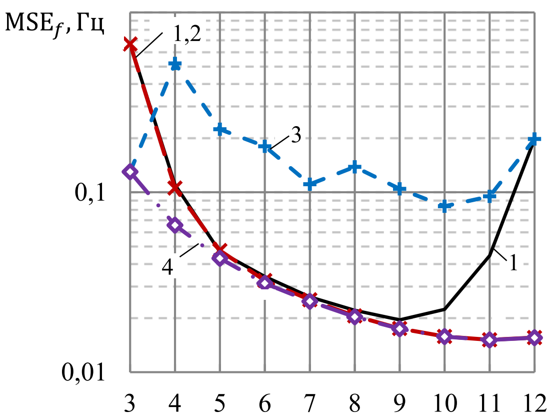
где $\widehat{f}_i$ и $\widehat{\alpha}_i$ – оценки коэффициента затухания апериодической слагаемой и частоты основной гармоники соответственно, полученные для -ой реализации сигнала.

Результаты экспериментов (рис. 2) дают основание сделать следующие выводы:

1. Подтверждается основной недостаток винеровской оценки, заключающийся в потере точности решения при ухудшении обусловленности системы (7) с ростом порядка структурной модели (в нашем решение вырождается при $M > 9$).

2. Базовое решение общей задачи МНК уступает практически всем методам настройки. Объясняется это тем, что младшие сингулярные числа σ_M и σ'_{M+1} траекторной $\mathbf{X}$ и расширенной $\mathbf{X}'$ матриц становятся неразличимо близки друг к другу. В таких условиях базовое решение теряет способность сопротивляться возмущениям в траекторной матрице и векторе наблюдения [15].

3. Решение общей задачи МНК с минимальной нормой при малом порядке структурной модели обеспечивает большую точность по сравнению с винеровской оценкой и решением МНК с минимальной нормой. Объяснение кроется в том, что при малом порядке модели существенный вклад в повышение точности оценки дает учет шума. С ростом порядка модели вклад, вносимый фильтром шума эффективной модели, становится все больше, и различие в решениях практически исчезает [8].



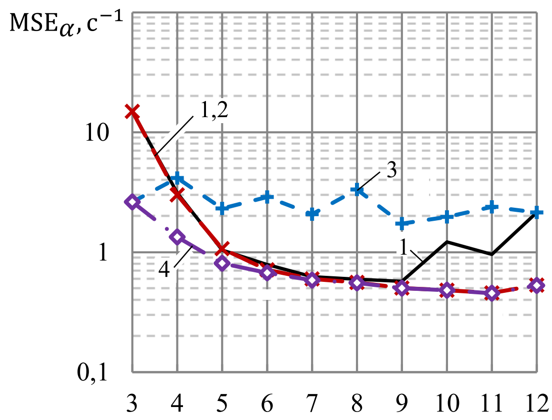


Рис. 2: Среднеквадратическая ошибка оценки частоты основной гармоники MSE_f (а) и среднеквадратическая ошибка оценки коэффициента затухания апериодической слагаемой MSE_α (б) при
SNR = 100 и размере выборки 24 отсчета: 1 – винеровская оценка; 2 – решение МНК с минимальной нормой; 3 – базовое решение общей задачи МНК; 4 – решение общей задачи МНК с минимальной нормой.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование адаптивного структурного анализа являются перспективным способом повышения точности и селективности релейной защиты, работающей в условиях искажения входных сигналов свободными составляющими аварийного процесса в сетях с FACTS и HVDC.

2. Разрешающая способность и вычислительная сложность алгоритма адаптивного структурного анализа определяется возможностями методов настройки структурных моделей. Для настройки могут применяться методы, основанные на решении задачи МНК (винеровская оценка и решение МНК с минимальной нормой), и методы, основанные на решении общей задачи МНК (базовое решение общей задачи МНК и решение с минимальной нормой).

3. Винеровские оценки принципиально возможны только при распознавании сигнала с шумом. При повышении порядка структурной модели оценки метода теряют состоятельность. Решение задачи МНК с минимальной нормой устраняет недостаток винеровской оценки и является устойчивой процедурой структурного анализа.

4. Существенное повышение разрешающей способности и устойчивости адаптивного структурного анализа при распознавании сигнала с шумом может быть достигнута за счет использования метода решения общей задачи МНК с минимальной нормой.
5. С ростом порядка модели преимущества методов (за исключением винеровской оценки) нивелируются. С точки зрения эффективного использования вычислительных ресурсов решение классического МНК с минимальной нормой становится предпочтительным при распознавании сигнала, представленного сравнительно большой выборкой отсчетов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] L. A. Trujillo G, A. Conde E, Zbigniew Leonowicz. Application of the Prony Method for Compensation of Errors in Distance Relay. //12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, (5-8 May 2013).

[2] Rulian Zhang, Chengyong Zhao. Prony analysis of electrical transient characteristics of AC system during HVDC commutation failure. // IPEC, 2010 Conference Proceedings (27-29 Oct. 2010). P. 807–812.

[3] Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г., Солдатов А.В., Фомин А.И. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих // Релейная защита и автоматизация. №1. 2016. С. 14 – 23.

[4] Impact of HVDC stations on protection of AC systems. CIGRE joint working group JWG B5/B4.25. December, 2011.

[5] Stig Holst, Ivo Brncic, David Shearer, Regnar Mangelred, Kees Koreman. Problems and solutions for AC transmission line protection under extreme conditions caused by very long HVDC cables. // Study committee B5 colloquium. October, 2007.

[6] Антонов В.И. Структурный анализ входных сигналов цифровых систем релейной защиты и противоаварийной автоматики. // Электротехника. №6. 1995. С. 56-61.

[7] Антонов В.И., Наумов В.А., Фомин А.И., Солдатов А.В. Адаптивный структурный анализ входных сигналов релейной защиты и автоматики // Электротехника. №7. 2015. С. 28 – 35.

[8] Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г. Фундаментальные свойства эффективных структурных моделей тока короткого замыкания электрической сети // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 3. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2014. С.18-29.

[9] Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения: Пер. с англ./Под ред. Г.И. Марчука. М.: Мир. 1980. 454 с.

[10] Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. – Wiley/ N.Y. 1949.

[11] Грант П.М., Коуэн К.Ф.Н., Фридлендер Б. и др. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.

[12] Голуб Дж. Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1999. – 548 с.

[13] Tufts D.W., Kumaresan R. Frequency estimation of multiple sinusoids: Making linear prediction perform like maximum likelihood // Proc. IEEE, vol. 70, no. 9, pp. 975-989, 1982.

[14] Huffel S. V., Vandewalle J. The Total Least Squares Problem: Computational Aspects and Analysis. Philadelphia: SIAM. 1991. 300 p.

[15] Golub G.H., Van Loan C.F. An Analysis of the Total Least Squares Problem //SIAM J. Num. Anal. Vol. 17. No. 6. 1980. P. 883-893.