

УДК 621.311

Н.В.Костерев, докт.техн.наук., **П.Л.Денисюк**, канд.техн.наук., **В.В.Литвинов** (Национальный тех.-нический университет Украины «КПИ», Киев)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИОРИТЕТНОСТИ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Решена задача выбора оптимальной последовательности применения способов повышения статической устойчивости узлов нагрузки с асинхронными двигателями в зависимости от тяжести послеаварийного режима. В качестве способов повышения статической устойчивости рассматривались: изменение коэффициента трансформации трансформатора, регулирование тока возбуждения синхронных двигателей, регулирование перетоков реактивной мощности с помощью источника реактивной энергии, принадлежащего узлу нагрузки, и отключение неответственных потребителей. Результатом решения оптимизационной задачи многокритериального анализа является вектор наилучших альтернатив, построенный по принципу доминантности. Для определения весовых коэффициентов важности критериев был использован метод Саати.

Розв'язано задачу вибору оптимальної послідовності застосування способів підвищення статичної стійкості вузла навантаження з асинхронними двигунами в залежності від важкості післяаварійного режиму. Як способи підвищення статичної стійкості розглядалися: зміна коефіцієнта трансформації трансформатора, регулювання струму збудження синхронних двигунів, регулювання перетоку реактивної потужності за допомогою джерела реактивної енергії, що належить вузлу навантаження, і відключення невідповідальних споживачів. Результатом рішення оптимізаційної задачі багатокритеріального аналізу є вектор найкращих альтернатив, побудований за принципом домінантності. Для визначення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв було використано метод Саати.

При решении задач выбора способов повышения статической устойчивости узлов нагрузки с асинхронными двигателями [4] появляется необходимость определения последовательности их применения в зависимости от тяжести послеаварийного режима. Способы повышения статической устойчивости узлов нагрузки с асинхронными двигателями представлены в [3,4]. Для оценки их эффективности к этим способам предъявляется ряд требований [3], которые можно представить в качестве критериев оптимизации. Следовательно, задача определения приоритетности действий для повышения статической устойчивости узла нагрузки относится к задачам многокритериальной оптимизации. При решении задачи многокритериальной оптимизации, математическая запись которой представлена в [6], возникают трудности с правильным подбором весовых коэффициентов важности оптимизационных критериев. Наиболее полный обзор методов их определения приводится в [1,2], а иерархическая структура самих методов показана в [5].

При решении практических задач обоснования требований и оценки коэффициентов веса возникает вопрос рационального выбора метода определения весовых коэффициентов. Нерациональный выбор метода приводит к недостаточной обоснованности производимых операций над малодостоверными исходными данными.

Анализ литературы [1,2,5] позволяет определить основные факторы, влияющие на выбор метода оценки весовых коэффициентов. Этими факторами являются: физическая сущность параметров, сложность получения экспертной информации, степень согласованности мнений экспертов, трудоемкость обработки исходных экспертных данных.

Определение весовых коэффициентов важности оптимизационных критериев оценки способа повышения статической устойчивости сталкивается со сложностью проведения экспертизы. Одним из

методов, требующих наименьшего времени общения с экспертами, является метод парных сравнений (метод Саати) [2], использующий шкалу относительной важности требований. С учетом сказанного, для определения весовых коэффициентов важности критериев используется именно метод Саати.

Постановка задачи. Имеется множество X , состоящее из n альтернативных вариантов: $X \in (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Примем для типовой схемы узла нагрузки, содержащего асинхронные двигатели, $n = 4$ [3,4]. Соответственно рассмотрим четыре альтернативных варианта:

X1 – регулирование коэффициента трансформации с помощью РПН (ПБВ);

X2 – регулирование тока возбуждения синхронных двигателей (компенсаторов);

X3 – регулирование перетока реактивной мощности с помощью источника реактивной мощности (БСК, СТК);

X4 – отключение неответственных потребителей.

В этом случае множество альтернативных критериев выбора оптимального варианта $R \in (r_1, r_2, \dots, r_m)$ принимает следующий вид при $m = 4$ [3]:

R1 – надежность способа повышения статической устойчивости;

R2 – быстрдействие способа повышения статической устойчивости;

R3 – экономичность способа повышения статической устойчивости;

R4 – минимизация риска нарушения технологического процесса на предприятии.

Суть метода парных сравнений состоит в том, что результаты попарного сравнения параметров описываются соотношениями их весов, т.е. могут быть представлены в виде матрицы A (матрицы Саати)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \dots & a_{ij} & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – степень доминантности i -го критерия над j -ым, $i, j = 1, \dots, m$.

Для матрицы Саати справедливы следующие соотношения:

$$a_{ii} = 1; \quad a_{i,j} = a_{j,i}^{-1}. \quad (2,3)$$

Определение весовых коэффициентов важности критериев. По результатам сравнительного влияния принятых критериев на обеспечение устойчивости узла нагрузки и возможных последствий предпочтения одного критерия другим и по результатам опроса эксперта по шкале относительной важности [2] было получено:

R2 доминирует над R1 с интенсивностью $a_{21} = 2$ (очень слабое превосходство);

R1 доминирует над R3 с интенсивностью $a_{13} = 6$ (сильное превосходство);

R4 доминирует над R1 с интенсивностью $a_{41} = 5$ (существенное превосходство);

R2 доминирует над R3 с интенсивностью $a_{23} = 4$ (среднее превосходство);

R4 доминирует над R2 с интенсивностью $a_{42} = 3$ (слабое превосходство);

R4 доминирует над R3 с интенсивностью $a_{43} = 8$ (подавляющее превосходство).

На основании этих данных составляется матрица попарных сравнений A

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 6 & 1/5 \\ 2 & 1 & 4 & 1/3 \\ 1/6 & 1/4 & 1 & 1/8 \\ 5 & 3 & 8 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Определяются собственные числа матрицы:

$$A - \lambda E = \begin{bmatrix} 1-\lambda & 1/2 & 6 & 1/5 \\ 2 & 1-\lambda & 4 & 1/3 \\ 1/6 & 1/4 & 1-\lambda & 1/8 \\ 5 & 3 & 8 & 1-\lambda \end{bmatrix} = (1-\lambda)^4 - 6(1-\lambda)^2 + 11,5(1-\lambda) - 25,8 = 0. \quad (5)$$

Уравнение имеет четыре корня:

$$\lambda_1 = 4,4059; \quad \lambda_2 = -1,3889; \quad \lambda_{3,4} = 0,4915 \pm j1,7065. \quad (6)$$

Смысл в данной задаче имеет лишь положительный действительный корень $\lambda_1 = 4,4059$, при подстановки которого в (5) решается система уравнений относительно вектора-столбца весовых коэффициентов ω :

$$(A - \lambda E)\Psi = \begin{bmatrix} 1-4,406 & 1/2 & 6 & 1/5 \\ 2 & 1-4,406 & 4 & 1/3 \\ 1/6 & 1/4 & 1-4,406 & 1/8 \\ 5 & 3 & 8 & 1-4,406 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

Результат перемножения матриц

$$\begin{cases} -3,4059\omega_1 + 0,5\omega_2 + 6\omega_3 + 0,2\omega_4 = 0 \\ 2\omega_1 - 3,4059\omega_2 + 4\omega_3 + 0,333\omega_4 = 0 \\ 0,166\omega_1 + 0,25\omega_2 - 3,4059\omega_3 + 0,125\omega_4 = 0 \\ 5\omega_1 + 3\omega_2 + 8\omega_3 - 3,4059\omega_4 = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Эта система имеет только нулевое решение. Для получения ненулевого вектора весов одно из уравнений заменяется условием нормировки $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$

$$\begin{cases} -3,4059\omega_1 + 0,5\omega_2 + 6\omega_3 + 0,2\omega_4 = 0 \\ 2\omega_1 - 3,4059\omega_2 + 4\omega_3 + 0,333\omega_4 = 0 \\ 0,166\omega_1 + 0,25\omega_2 - 3,4059\omega_3 + 0,125\omega_4 = 0 \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1 \end{cases}. \quad (9)$$

Система (9) имеет единственное решение, которое и будет коэффициентами важности (веса) критериев оценки способа повышения статической устойчивости:

$$\omega_1 = 0,142; \quad \omega_2 = 0,196; \quad \omega_3 = 0,044; \quad \omega_4 = 0,618. \quad (10)$$

Определение оптимальной последовательности способов повышения запаса статической устойчивости. Имея полученные весовые коэффициенты, необходимо определить, какое из альтернативных решений необходимо применить в первую очередь – при небольших, но уже недопустимых, отклонениях напряжения, а какое – в случае возникновения серьезной опасности нарушения статической устойчивости. Очевидно, что наилучшим способом повышения статической устойчивости, а следовательно способом, реализуемым в первую очередь, следует считать ту альтернативу, у которой

степень недоминируемости по обоим сверткам будет максимальной. Поэтому для решения задачи поиска оптимального решения в условиях многокритериального выбора целесообразно выбрать принцип доминантности [5].

Для получения сверток компонент многоцелевого показателя использованы отношения предпочтения альтернатив по критериям (\succ – «лучше», \prec – «хуже», \sim – «эквивалентно», «равноценно») на основании физических процессов в узле нагрузки, протекающих при определенном способе повышения статической устойчивости с точки зрения того или иного критерия.

Надежность способа (R1):

$X1 \prec X3, X1 \prec X2, X1 \succ \succ X4, X2 \sim X3$ (РПН – наименее надежный элемент трансформатора; поэтому регулирование напряжения лучше осуществлять регулированием перетока реактивной мощности с помощью БСК или СД, так как это входит в функции этих устройств; отключение неответственных двигателей с точки зрения надежности является крайней мерой вследствие высокой изношенности заводского электрооборудования и тяжелых условий пуска мощных асинхронных двигателей).

Быстродействие способа (R2):

$X1 \prec X2, X1 \prec X3, X1 \prec X4, X2 \succ X3, X3 \sim X4$ (переключение РПН занимает несколько секунд, то есть время, соизмеримое со временем нарушения устойчивости двигателей и с постоянной инерции ротора, тогда как коммутации выключателей БСК и неответственных асинхронных двигателей занимают 0,2–0,3 секунды, постоянные времени современных систем возбуждения синхронных машин – порядка 0,05–0,1 секунды).

Экономичность способа (R3):

$X4 \prec X2, X4 \prec X3, X2 \prec X3, X1 \succ X2, X3 \succ X1$ (отключение двигателей, способствуя сохранению устойчивости узла нагрузки, часто вызывает недоотпуск продукции или снижение ее качества, причиняя определенный ущерб, пусть значительно меньший, чем от нарушения устойчивости, тогда как существенно повысить напряжение узла нагрузки можно путем изменения коэффициента трансформации трансформатора, не изменяя перетока реактивной мощности, требования по которому обычно жестко регламентированы в отношениях предприятия и энергоснабжающей компании и его существенное изменение даже в технологических целях может привести к штрафам).

Минимизация риска нарушения технологического процесса (R4):

$X3 \sim X2, X3 \succ X1, X1 \succ X4$ (как было сказано выше, отключение потребителей приводит к изменению технологического процесса, при выходе из строя РПН трансформатора есть риск нарушения электроснабжения узла нагрузки, тогда как регулирование тока возбуждения мощных синхронных двигателей и количества параллельных батарей конденсаторов не оказывает негативного влияния на качество технологического процесса).

На основании полученных предпочтений строятся свертки $\mu_{rk}(x_i, x_j) \quad k=1,2,3,4$

$$\mu_{R1}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ x_2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}; \quad \mu_{R2}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_3 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ x_4 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{array}; \quad (11)$$

$$\mu_{R3}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ x_2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ x_3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}; \quad \mu_{R4}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ x_2 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ x_3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Определение первой свертки $\mu_{Q1}(x_i, x_j)$

$$\mu_{Q_1}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ x_3 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ x_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \quad (12)$$

Определение отношений строгого предпочтения по первой свертке $\mu_{Q_1^s}(x_i, x_j)$

$$\mu_{Q_1^s}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x_3 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ x_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad (13)$$

Определение множества недоминирующих альтернатив по первой свертке

$$\mu_{Q_1^{nd}}(x) = 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0. \quad (14)$$

Определение второй свертки

$$\mu_{Q_2}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 1 & 0,662 & 0 & 0,804 \\ x_2 & 0,338 & 1 & 0,956 & 1 \\ x_3 & 0,534 & 0,804 & 1 & 1 \\ x_4 & 0,196 & 0 & 0,196 & 1 \end{array} \quad (15)$$

Определение отношения строгого предпочтения по второй свертке $\mu_{Q_2^s}(x_i, x_j)$

$$\mu_{Q_2^s}(x_i, x_j) \Rightarrow \begin{array}{c|cccc} x_i/x_j & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline x_1 & 0 & 0,324 & 0 & 0,608 \\ x_2 & 0 & 0 & 0,152 & 1 \\ x_3 & 0,534 & 0 & 0 & 0,804 \\ x_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad (16)$$

Определение множества недоминирующих альтернатив по второй свертке $\mu_{Q_2^{nd}}(x)$

$$\mu_{Q_2^{nd}}(x) = 0,466 \quad 0,676 \quad 0,848 \quad 0. \quad (17)$$

Определение наилучшей альтернативы $\mu_{Q_0}(x)$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{Q_1^{nd}}(x) = 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \\ \mu_{Q_2^{nd}}(x) = 0,466 \quad 0,676 \quad 0,848 \quad 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \mu_{Q_0}(x) = 0,466 \quad 1 \quad 1 \quad 0. \quad (18)$$

В результате решения задачи многокритериальной оптимизации получено:

— решения X2 (регулирование тока возбуждения синхронных двигателей) и X3 (регулирование перетока реактивной мощности с помощью источника реактивной мощности) являются наилучшими с одинаковой степенью недоминантности по обоим сверткам, то есть с равной приоритетностью применения;

- решение X1 (регулирование коэффициента трансформации) хуже по сравнению с X2 и X3;
- решение X4 (отключение неответственных потребителей) является наихудшим из четырех.

На основании полученных результатов можно предложить следующее. Если в реальных промышленных узлах нагрузки по условиям технологического процесса установлены мощные синхронные двигатели, то нет необходимости в установке дополнительных источников реактивной мощности (БСК, СТК). И, наоборот, если синхронные двигатели не предусмотрены, то для компенсации реактивной мощности установлены БСК или СТК. Учитывая эту взаимную исключаемость вариантов X2 и X3, а также их равную приоритетность при решении задачи повышения статической устойчивости, представляется целесообразным их объединение. В этом случае приоритетность использования способов повышения статической устойчивости имеет следующий вид:

- 1) регулирование перетока реактивной мощности с помощью источника реактивной мощности;
- 2) регулирование напряжения путем изменения коэффициента трансформации трансформатора;
- 3) снижение перетока мощности к узлу нагрузки путем отключения неответственных потребителей.

Выводы. Метод доминантности позволяет получить оптимальную последовательность применения способов повышения запаса статической устойчивости узла нагрузки с асинхронными двигателями, причем определяется только качественное доминирование одного способа над другим с точки зрения поставленной задачи. Для количественного определения степени применения каждого из способов необходимо использование других методов многокритериальной оптимизации.

Полученный в результате решения поставленной задачи результат подходит только для типовых узлов нагрузки энергосистемы. Для узлов нагрузки, отличных от рассмотренного в этой задаче, необходимо учитывать эти отличия при принятии экспертом решения о доминировании критериев по шкале относительной важности и при составлении отношений предпочтения альтернатив по критериям. Также необходимо учитывать квалификацию эксперта и субъективность восприятия им шкалы относительной важности критериев.

1. Анохин А.М., Готов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев. // Автоматика и телемеханика. – 1997. – №8. – С. 3–35.
2. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Системный подход. – К.: ООО ТИД «Диасофт», 2004. – 318 с.
3. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.
4. Литвинов В.В., Костерев Н.В., Денисюк П.Л. Модель фаззи-контроллера для обеспечения статической устойчивости промышленного узла нагрузки энергосистемы. // 36. наук.праць Донецького нац. техн. ун-ту. Серія „Електротехніка і енергетика”. Вип.8(140). – Донецьк: ДВНЗ „ДонНТУ”, 2008. – С. 51–54.
5. Хоменюк В.В. Элементы теории многокритериальной оптимизации. М.: Наука, 1983, – 360 с.
6. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления, приложения. М.: Наука, 1982, – 382 с.

Надійшла 13.03.2009