

Ю.А. Папаика, к.т.н., А.Г. Лысенко

(Украина, Днепрпетровск, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ТИРИСТОРНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ МОЩНОСТИ

Современные электропечи сопротивления (ЭПС), применяемые в машиностроении, имеют тиристорные регуляторы мощности (ТРМ). При значительном количестве в цехе печной нагрузки с ТРМ ухудшается электромагнитная совместимость. Для решения данной проблемы были предложены специальные неполнофазные режимы работы нагревателей электропечей [1-2] и разработан способ управления режимами электропотребления ЭПС [3].

Специфика разработанного способа управления режимами ЭПС состоит в использовании трехфазной электропечи сопротивления с тиристорным регулированием в качестве симметрирующего устройства трехфазной четырехпроводной сети. Такой подход позволяет снизить несимметрию и несинусоидальность в сети 0,4 кВ промышленных предприятий, повысить энергетические показатели установки за счет ограничения потребления реактивной мощности, уменьшить дополнительные потери активной мощности в электрооборудовании (трансформаторах, асинхронных двигателях, конденсаторных установках), и тем самым продлить их срок службы. Все это зависит от правильности определения наиболее загруженной фазы сети. При этом следует учесть фазность питания нагревателей ЭПС, а также динамику процесса изменения нагрузки в течение рабочей смены промышленного предприятия. Принято, что снижение несимметрии и несинусоидальности возможно при переводе установки как на двухфазный, так и однофазный режимы работы. Поэтому должны оцениваться эти два режима. Существует вероятность такого события, что напряжение в сети 0,4 кВ симметрично, и реализация неполнофазных режимов питания ЭПС приведет к искажению системы напряжений. С точки зрения симметрирования напряжения и повышения энергетических показателей установки двухфазный и однофазный режимы имеют различные характеристики, что должно учитываться при поиске рациональных режимов.

Требования ГОСТ 13109-97 на качество электроэнергии в сетях 0,4 кВ показывают, что на зажимах электроприемников длительное значение коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательности не должно превышать 2%. Значение коэффициента искажения синусоидальности в длительном режиме работы допускается не более 8%. Проведенный анализ [4] показал, что при нагрузке цехового трансформатора ЭПС суммарной мощностью более 15% от $S_{н\tau}$ выполнить требуемые ГОСТ нормы по несинусоидальности

из-за резкого увеличения уровня генерации высших гармоник не представляется возможным. Решение состоит в том, чтобы использовать неполнофазные режимы питания трехфазных электропечей. Изменение фазности питания электропечей должно происходить таким образом, чтобы достигался положительный эффект при снижении несинусоидальности и повышении энергетических показателей одновременно. Речь идет о том, что не всегда возможно использовать неполнофазные режимы питания (например, при симметричной нагрузке трансформатора и отключении одной из фаз электропечи наблюдается искажение напряжений, что приведет к увеличению коэффициентов несимметрии). Поэтому должна решаться задача выбора рациональных режимов с учетом нескольких равноприоритетных критериев.

При анализе эксплуатационных режимов цеховых распределительных сетей возникают задачи, имеющие множество решений. Последние относятся к разряду многовариантных и имеют место, когда количество переменных больше количества задающих условий. При этом требуется найти наилучшее решение среди потенциально возможных по принятым критериям.

Основной задачей управления системами электроснабжения является бесперебойное обеспечение энергией потребителей, согласно их категорий надежности. Поэтому главным критерием данного иерархического уровня считается минимум общих затрат, т. е. затрат, соизмеряющих с учетом фактора времени единовременные капиталовложения и ежегодные затраты.

Однако специфика решения такова, что предлагаемые методы повышения качества электроэнергии не требуют дополнительных капиталовложений на установку компенсирующих устройств, а рассматривают вопросы качества как изменение режимных параметров нагревательных установок (печей сопротивления). При такой постановке вопроса на первый план выходят показатели качества электроэнергии и дополнительные потери активной мощности в цеховом электрооборудовании.

Определим основные критерии выбора рационального режима:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого напряжения $K_{\text{нec}}$;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{U_2} ;
- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{U_0} ;
- коэффициент мощности k_m ;
- коэффициент сдвига k_c ;
- коэффициент искажения k_n ;
- дополнительные потери в электрооборудовании $\Delta P_{\text{дон}}$.

Изменение коэффициентов несимметрии и несинусоидальности имеет случайный характер, поскольку их значения зависят от параметров сети. К параметрам, которые зависят от режима работы ЭПС, относятся энергетические коэффициенты (k_m, k_c, k_n). Рассматривая многокритериальную задачу выбора,

необходимо определять соотношения режимных параметров при всех возможных решениях.

Возможные оценки при решении многовариантной задачи – это следующие возможные режимы работы электропечи сопротивления:

- трехфазный режим работы;
- двухфазный режим работы;
- однофазный режим работы.

Для решения задачи необходимо составить математическую модель, адекватно отражающую происходящие в системе процессы.

Задача принятия решения состоит в выборе среди множества возможных решений (их называют также вариантами, планами и т. п.) такого решения, которое являлось бы в определенном смысле лучшим.

Каждое возможное решение характеризуется определенной степенью достижения цели. В соответствии с этим должно иметься представление о достоинствах и недостатках решений, на основании которого одно решение предпочитается другому. Оптимальное решение – это такое, которое принимается на основании приоритетных оценок и которое предпочтительнее других возможных решений. Эти предпочтения на практике выражаются в различной форме, и их математическая формализация может составить сложную зависимость.

В отличие от общей задачи принятия решений в многокритериальной задаче заранее известна определенная информация о предпочтениях принятия решение. Это сведения о том, что желательно целевые функции максимизировать (или минимизировать). При этом может быть известна и использована другая дополнительная информация о предпочтениях. Для описания предпочтений при принятии решений используют математическое понятия, называемое отношением.

Для нахождения основных критериев используются заранее установленные алгоритмы, соответствующие каждому из возможных режимов работы.

Из трех возможных решений необходимо выбрать наилучшее. Примечательно, что первые три критерия необходимо минимизировать, а остальные максимизировать.

Следовательно, в данной работе рассмотрим многокритериальную задачу, в которой – семь критериев и три возможных решения (оценок).

Алгоритм нахождения рационального режима построим на основе теорем решений оптимальных по Парето [5, 6]. Этот метод достаточно полно освещен в литературе, широко используется для решения многокритериальных задач и, что особенно важно для данной работы, может быть достаточно легко реализован в программном виде для контроллера управления печью. Составим таблицу критериев и оценок в общем виде для разработки пути поиска решений

В таблице представлены три решения $(X^{(11)}, X^{(12)}, X^{(13)})$, которые соответственно равносильны трехфазному, двухфазному и однофазному режимам работы нагревательной установки (ЭПС).

Таблица критериев

Критерии	$X^{(11)}$	$X^{(12)}$	$X^{(13)}$
$K_{\text{нес}}$	x_{11}	x_{21}	x_{31}
K_{U2}	x_{12}	x_{22}	x_{32}
K_{U0}	x_{13}	x_{23}	x_{33}
k_m	x_{14}	x_{24}	x_{34}
k_c	x_{15}	x_{25}	x_{35}
k_n	x_{16}	x_{26}	x_{36}
$\Delta P_{\text{дон}}$	x_{17}	x_{27}	x_{37}

Критерии представлены в виде матриц-столбцов.

$$X^{(11)} = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \end{pmatrix}, \quad X^{(12)} = \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \end{pmatrix}, \quad X^{(13)} = \begin{pmatrix} x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \\ x_{36} \\ x_{37} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Значения массивов заполняются решениями своих целевых функций, которые определяются отдельно для каждого режима работы непосредственно в процессе эксплуатации печных установок.

Алгоритм нахождения множества решений носит конструктивный характер и состоит из нескольких этапов.

Введем некоторые обозначения:

$X = X_1 = \{x^{(11)}, x^{(12)}, \dots, x^{(1n_1)}\}$ – множество возможных решений.

Если $n_1 = 1$, то $X_1 = \{x^{(11)}\} = \text{opt}_f X_1$, что означает наличие единственно возможного решения. Поэтому становится ясно, что при рассмотрении многокритериальных задач $n_1 > 1$ (в данной работе $n_1 = 3$).

Первый шаг алгоритма заключается в попарном сравнении решения $x^{(11)}$ с каждым из остальных решений. Если для некоторого $i \in \{2, 3, \dots, n\}$ выполняется соотношение $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(i)}$, то решение $x^{(i)}$ удаляют из множества X_1 – оно не может быть рациональным. В противном случае, т.е. когда $x^{(11)} \sim x^{(i)}$, что означает неразличимость данных решений, либо когда $x^{(i)} \mathbf{f} x^{(11)}$, то решение $x^{(i)}$ сохраняют. После сравнения решение $x^{(11)}$ также следует удалить из X_1 . При этом, если ни для какого $i = 2, 3, \dots, n_1$ не оказалось выполненным соотношение $x^{(i)} \mathbf{f} x^{(11)}$, то решение $x^{(11)}$ является оптимальным и его нужно запомнить. Ос-

тавшееся в результате перебора множество решений обозначим через $X_2 = \{x^{(21)}, x^{(22)}, \dots, x^{(2n_2)}\}$, при чем $n_2 < n_1$.

Если $X_2 = \emptyset$, то решение $x^{(11)}$ оптимальное (оно хранится в памяти), поскольку в силу асимметричности отношения \mathbf{f} из соотношения $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(1i)}$ следует, что соотношение $x^{(1i)} \mathbf{f} x^{(11)}$, $i = 2, 3, \dots, n_1$ не может иметь место. В этом случае процедура отыскания множества $opt_{\mathbf{f}} X_1$ закончена. Если же $X_2 \neq \emptyset$, то переходят к следующему шагу алгоритма.

Второй шаг аналогичен первому и заключается в попарном сравнении решения $x^{(21)}$ с каждым из решений $x^{(22)}, x^{(23)}, \dots, x^{(2n_2)}$. Все решения $x^{(2i)}$, для которых $x^{(21)} \mathbf{f} x^{(2i)}$, из множества X_2 исключают. Кроме того, удаляют решение $x^{(21)}$. При этом, если ни для какого $i = 2, 3, \dots, n_2$ не оказалось выполненным соотношение $x^{(2i)} \mathbf{f} x^{(21)}$ то $x^{(21)} \in opt_{\mathbf{f}} X_2$. Более того, $x^{(21)} \in opt_{\mathbf{f}} X_1$, и решение $x^{(21)}$ следует запомнить. В самом деле, соотношение $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(21)}$ не может иметь места, так как решение $x^{(21)}$ не было удалено из X_1 на первом шаге. Соотношение $x^{(1i)} \mathbf{f} x^{(21)}$ для $x^{(1i)} \in X_1 \setminus X_2, i \neq 1$, также не может быть выполнено, поскольку $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(1i)}$ и отношение \mathbf{f} транзитивно: из $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(1i)}$ и $x^{(1i)} \mathbf{f} x^{(21)}$ следует, что $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(21)}$. Оставшееся после исключения множество решений обозначают через $X_3 = \{x^{(31)}, x^{(32)}, \dots, x^{(3n_3)}\}$ $n_3 < n_2$. Если $X_3 \neq \emptyset$, то переходят к следующему шагу и т. д.

Алгоритм таков, что, согласно транзитивности отношения \mathbf{f} , решение $x^{(k1)}$, оптимальное на множестве X_k , будет оптимальным и на множестве X_{k-1} $k = 2, 3, \dots, n$, а значит, и на исходном множестве X_1 .

Так как множество X_1 содержит конечное число элементов, то через конечное число шагов процедура закончится. Решения, хранящиеся в памяти, образуют искомое непустое множество $opt_{\mathbf{f}} X$.

Трудоемкость сформулированного алгоритма состоит в определении наименьшего и наибольшего возможного числа попарных сравнений, которое потребуется для нахождения всего множества $opt_{\mathbf{f}} X$. Наименьшее число сравнений $n_1 - 1$ имеет место, когда $x^{(11)} \mathbf{f} x^{(1i)}$. В самом «длинном варианте» придется сравнивать между собой все возможные пары решений, и поэтому максимальное число сравнений равно $n_1(n_1 - 1)/2$. Для условий данной работы $n_1 = 3$, следовательно, максимально возможное количество операций попарного сравнения равно трем.

Выводы

1. Таким образом, сформулирована и решена задача выбора рационального режима электропотребления ЭПС, которая объединяет сетевые параметры и параметры печи, что важно на практике;

2. Определены критерии выбора рационального режима электропотребления ЭПС;

3. Разработанный способ позволяет выбрать рациональный режим работы электропечи при компромиссных взаимоисключающих решениях.

Список литературы

1. Папаика Ю.А. Рациональные режимы электропотребления печей сопротивления с тиристорным регулированием / Ю.А. Папаика // Техн. електродинаміка. – 2006. – №4. – С. 87–89.
2. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Обоснование применения специальных режимов нагрева электропечей сопротивления для повышения качества электроэнергии в распределительных сетях промышленных предприятий / Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірничя електромеханіка та автоматика. Науково. техн. зб. – 2008. – Вип. 80. – С. 12–17.
3. Пат. України 82854, МПК G05D 23/19, H05B 3/00. Спосіб керування режимами електроспоживання нагрівальної установки / Півняк Г.Г., Випанасенко С.І., Папаїка Ю.А.; заявник та патентовласник Національний гірничий університет. – № а 2005 03663; заявл. 18.04.2005; опубл. 26.05.2008, Бюл.№10.
4. Музиченко О.Д. Сучасний стан та шляхи встановлення відповідальності приймачів за погіршення якості електричної енергії / О.Д. Музиченко // Техн. електродинаміка. – 1998.– №1. – С.61–65.
5. Батищев Д.И. Поискные методы оптимального проектирования / Д.И. Батищев. – М.: Сов. радио, 1975. – 184 с.
6. Ногин В.Д. Основы теории оптимизации / В.Д. Ногин, К.О. Протодряконов, И.И. Евлампиев. – М.: Высш. шк., 1986. – 384 с.

Рекомендовано до друку: доцентом Колбом Андр. А.