

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Y. DJEGHADER, H. LABAR

Аннотация: Электрическая дуга — это стохастический процесс; она является основной причиной проблем с качеством электроэнергии, включая провалы напряжения, гармонические искажения, несбалансированные нагрузки и мерцание. Таким образом, трудно создать подходящую модель для ЭСП. Факторами, влияющими на работу ЭСП, являются плавление или рафинирование материалов, стадия плавления, электроосаждение (длина дуги), управление электродным рычагом и мощность питателя при коротком замыкании.

Таким образом, напряжения, ток и мощность дуги определяются как нелинейная функция длины дуги. В этой статье мы предлагаем нашу собственную эмпирическую функцию ЭСП и модель для средних стадий процесса плавки. Это исследование важно, поскольку улучшение качества электрической дуги означает высокую производительность (в тоннах/год) и минимально возможные затраты, связанные с потреблением энергии, износом электродов и огнеупоров.

Ключевые слова: ЭСП, электрическая дуга, Моделирование, Качество электроэнергии, выплавка стали.

1. Введение.

Нелинейные нагрузки являются основной причиной проблем с качеством электроэнергии, включая провалы напряжения, гармонические искажения и мерцание [2, 11, 12]. Электродуговая печь является наихудшим типом нелинейных нагрузок, и ее нелинейность обусловлена хаотической природой импеданса дуги [6], где ее проводимость определяется температурой и давлением [10]. Растущий спрос на чугун, например, в автомобильной промышленности, побуждает сталелитейные заводы все больше инвестировать в извлечение металлов благодаря электрическим или химическим печам. Электродуговая печь используется для получения высококачественной стали из стального лома. Типичная печь представляет собой

показано на рисунке 1. Печь состоит из футерованного огнеупором корпуса и съемной крыши. Три графитовых электрода, закрепленных зажимами на конце опорного кронштейна мачты, проходят через отверстия в крыше печи. Электрическая мощность подается на электроды с помощью отводящего трансформатора с регулируемым напряжением, а тепло, выделяемое электрическими дугами, возникающими между электродами и расплавленным ломом. Максимальное преобразование электрической мощности в тепловую происходит при определенной длине электрической дуги [7], и любое отклонение от этой оптимальной длины снижает эффективность использования электроэнергии. Поверхность стального лома неровная по своей природе, и по мере расплавления части лома перемещаются, изменяя контуры поверхности. Таким образом, случайные колебания длины дуги происходят непрерывно. Функция системы контроля положения заключается в том, чтобы реагировать на такие возмущения перемещением электрода для поддержания длины дуги на заданном значении [8].

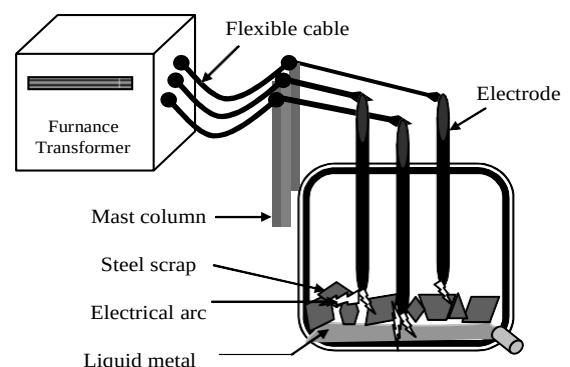


Рис.1 Типичная электродуговая печь

1. Типичный процесс ЭДП.

Сначала мы загружаем в печь металлолом, после чего можно опускать электроды, каждый из которых имеет свой собственный регулятор и механический привод. Электроды подключаются к трансформатору печи, который может быть рассчитан на напряжение от 90 до 265 вольт, благодаря 9 отводам.

Чтобы добиться расплавления как можно быстрее, необходимо выполнить следующие этапы [1, 3].

Этап-1: Подача тока инициируется опусканием электродов над материалом.

Этап-2: Электроды проходят через металлолом, образуя лужу жидкого металла.

Этап-3: Электрическая дуга удлиняется за счет увеличения напряжения до максимальной мощности.

Этап-4: Длина дуги изменяется таким образом, чтобы более короткая дуга передавала большую часть своего тепла металлу под электродом.

Этап-5: Химическая обработка для улучшения качества стали проводится при низкой мощности, чтобы сохранить сталь жидкой

Этап-6: Остановка плавления.

1. Описание модели

Наш EAF плавит сталь, подавая переменный ток на загрузку стального лома с помощью графитовых электродов. Для этого требуется около 520 кВт*ч на тонну, а производительность составляет приблизительно 700 тонн в год (рис. 2, а).

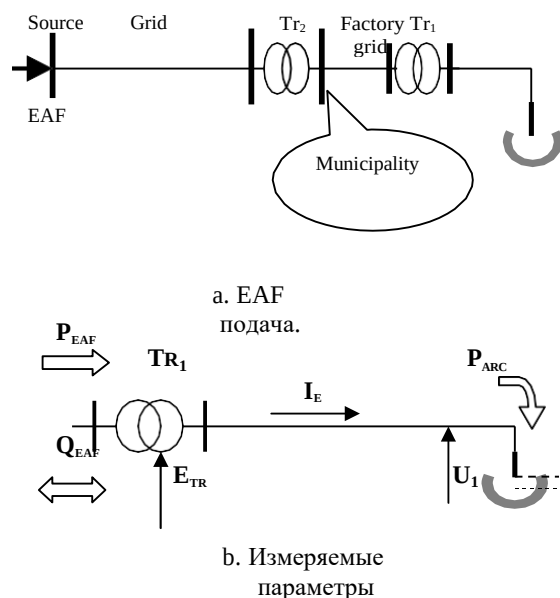


Рис.2. Изученный режим.

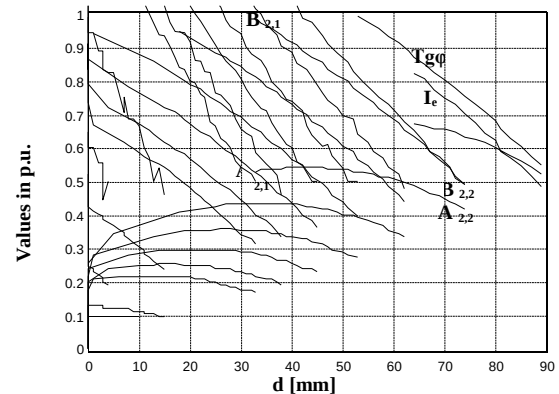


Рис.3. EAF процесс [2]

Все процессы в электродуговой печи (приложение А) можно кратко изложить на рисунке 4 [9]. у нас есть запись 32 измерений каждого измеряемого параметра для 9 отводов трансформатора Рис.3.б. нормальная работа должна обеспечивать компромисс между ограничениями в соответствии с максимальной мощностью и допустимым током соответственно [An,1 An,2] и [Bn,1 Bn,2], где n - индекс отвода. Затем, в соответствии с этим ограничением, закон регулировки положения электродов будет выполняться в соответствии с S_{max}

1. Обработка измеренных параметров.

ЭДП моделируется совместно с соседней сетью [4]. Уравнение схемы подключения печного трансформатора к концевым электродам можно представить следующим образом

$$E_{tr} = \sqrt{3}Z_1 I_e + U_1 \quad (1)$$

Где U_1 , I_e & Z_1 являются соответственно напряжением электрода, током и полным сопротивлением трансформатора ЭДП с гибким кабелем

$$\text{Then, } Z_1 = \frac{[E_{tr} - U_1]}{\sqrt{3}I_e} = \frac{\Delta U_1}{\sqrt{3}I_e} \quad (2)$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 (I_2, T) + X_1^2 (T)} \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{P_{EAF} - P_{arc}}{3I_e^2} \quad (4)$$

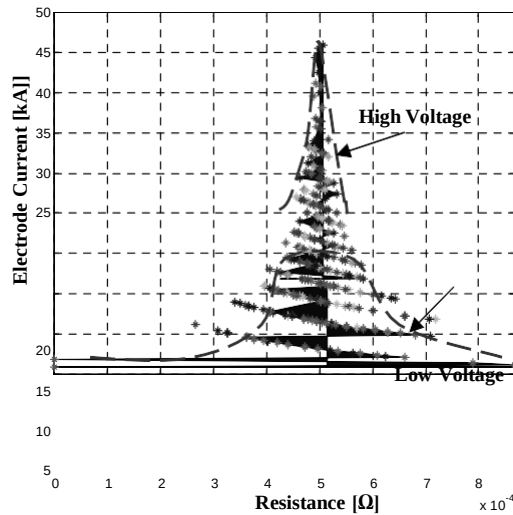
Где:

P_{EAF} : - общая активная мощность ЭДП.

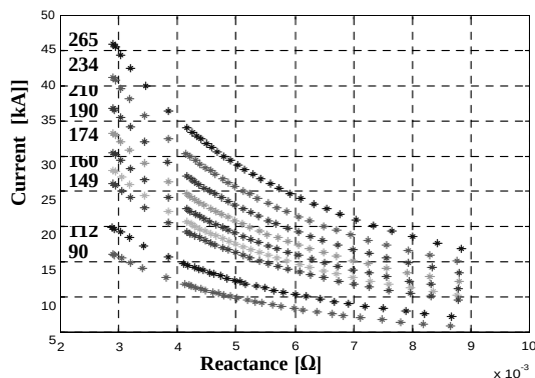
И P_{arc} : - активная мощность дуги.

Итак, из уравнений (1, 2 и 3) мы можем вывести.

$$X_1 = \frac{1}{\sqrt{3}I_e} \sqrt{\Delta U_1^2 - \frac{[P_{EAF} - P_{arc}]^2}{3I_e^2}} \quad (5)$$



a. R_1



b. X_1

Fig.4. Calculation of Z_1 form the 9x32 measurements

На рис. 4, а и в, мы показываем изменение сопротивления R_1 и реактивного сопротивления X_1 трансформатора с гибким кабелем, который питает электроды.

$$R_1 = R_{tr} + R_{\text{гибкий кабель}} \quad (6)$$

Действительно, для различных проведенных тестов:

- R_1 имеет гауссово распределение; это связано с комбинированным воздействием тока и времени его подачи. Дисперсия более важна при низком напряжении, поскольку металлу требуется больше времени для расплавления; из-за этого происходит перегрев обмотки трансформатора и гибкого кабеля.

- Поскольку реактивное сопротивление X_1 является следствием электромагнитных полей, которые ослабевают с повышением температуры, это придает ему умеренное экспоненциальное изменение.

Изменение R_1 “Рис.4.а” является следствием быстрого роста температуры, определяемого как температурный коэффициент, вызванный значительным током, подаваемым в процессе плавления. Чтобы уменьшить этот разброс параметров, мы предлагаем усилить охлаждение за счет принудительной вентиляции обмоток трансформатора и увеличить поток воды, проходящий через гибкие кабели.

$$R_{arc} = \frac{P_{arc}}{3I_e^2} \quad (7)$$

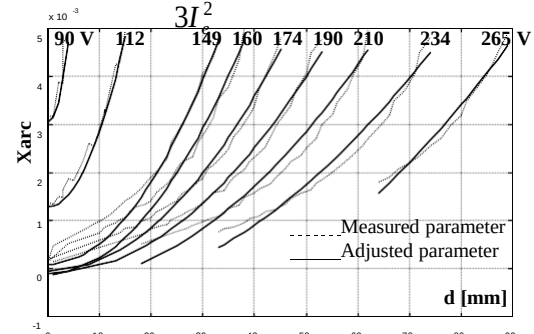
$$Q_{EAF} = Q_{arc} + \Delta Q \quad (8)$$

$$Q_{arc} = Q_{EAF} - 3I_e^2 X_1 \quad (9)$$

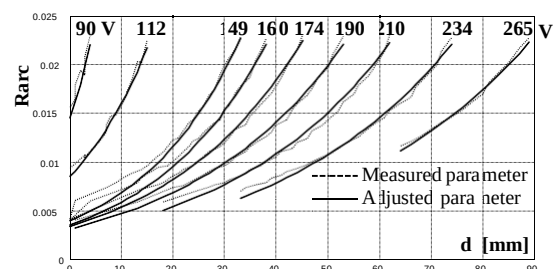
Где Q_{EAF} - общая реактивная мощность ЭДП.

And Q_{arc} это реактивная мощность дуги.

$$X_{arc} = \frac{Q_{arc}}{3I_e^2} \quad (10)$$



a. X_{arc}



b. R_{arc}

Рис.5. Изменение импеданса электрической дуги.

На рисунках 5а и б мы показываем изменение R_{arc} и X_{arc} с расстоянием между электродами и ломом “d”.

Непрерывная линия представляет измеренный параметр, а прерывистая линия представляет скорректированный параметр, когда закон регулировки

положение электродов будет выполнено в соответствии с $S_{\max}$. В соответствии с этим подходом предлагается эмпирическая модель:

$$R_{arc} = A(u)e^{\alpha(u)d}; \text{ Where}$$

$$A_R = \left[\frac{0,7 \cdot (U - 210)^2 + 1,7}{50^2} \right] \cdot 10^{-3};$$

$$\alpha = 0,097e^{0,011(90-U)} - \frac{1,7}{(U-112)^2 + 80} + \frac{100}{(U-360)^2 + 50}$$

$$X_{arc} = A_X(u)d^2 + B_X(u); \text{ Where}$$

$$A_X = 1,05 \cdot 10^{-3} e^{0,075(90-U)};$$

$$B_X = \frac{3,14}{153} - 3 \cdot 10^{-3} e^{0,075(90-U)}$$

d: Это расстояние между электродом и ломом.

В рабочей зоне сопротивление дуги уменьшается с увеличением напряжения и увеличивается с увеличением расстояния между электродами и металлом, "Рис.6, 7". Анализ результатов показывает, что при высоких напряжениях и коротком расстоянии дуги электростатическое поле, создаваемое между электродом и металлом, более важно, чем электромагнитные поля, что придает дуге емкостной характер. Это можно наблюдать на рисунке 5 по отрицательным значениям X_{arc} .

Для этой цели мы приводим модель электрической дуги показано на рисунке 6.

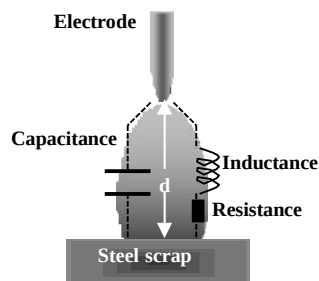


Рис.6. Модель электрической дуги.

$$Q = Q^L + Q^C \quad (11)$$

$$Q_{arc}^L = K_L d \quad (12)$$

$$Q_{arc}^C = -K_C / d \quad (13)$$

Q_{EAF}^L : - Индуктивная реактивная мощность дуги.

Q_{arc}^C : - Емкостная реактивная мощность дуги.

Из уравнений (11, 12, 13) мы можем написать

$$Q_{arc} = \frac{K_L d^2 - K_C}{d} \quad (14)$$

$$K_L(n) = \frac{Q_{arc}(n+1)d(n+1) - Q_{arc}(n)d(n)}{d^2(n+1) - d^2(n)}$$

n: это номер измерения

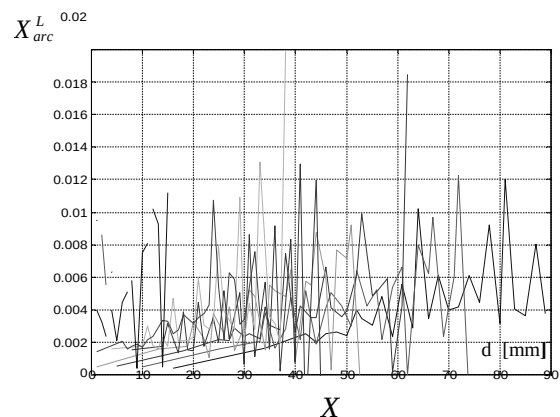
$$K_L(n) = K_L(n)d^2(n+1) - Q_{arc}(n+1)d(n+1)$$

$$Q_{arc}^L = K_L d^L = 3X_{arc}^L I_e^2 \Rightarrow$$

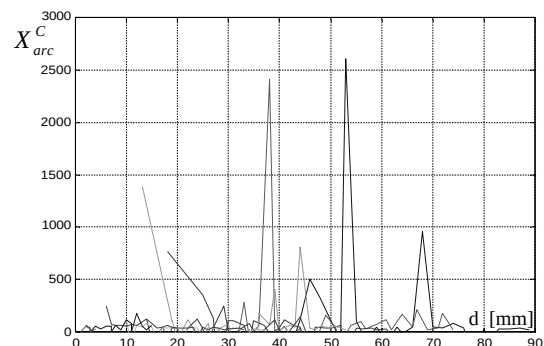
$$X_{arc}^L = K_L d / 3I_e^2 \quad (15)$$

$$Q_{arc}^C = -K_C / d = -1 / X_{arc}^C \Rightarrow$$

$$X_{arc}^C = U^2 d / K_C \quad (16)$$



а. Рассеивание X_{arc}^L



а. Dispersion of X_{arc}^C

Рис.7. Расчет Z_{arc} размером 9x32

После численной обработки измеренных параметров мы предлагаем модель для основных стадий процесса плавания, обобщенную на рис. 8.

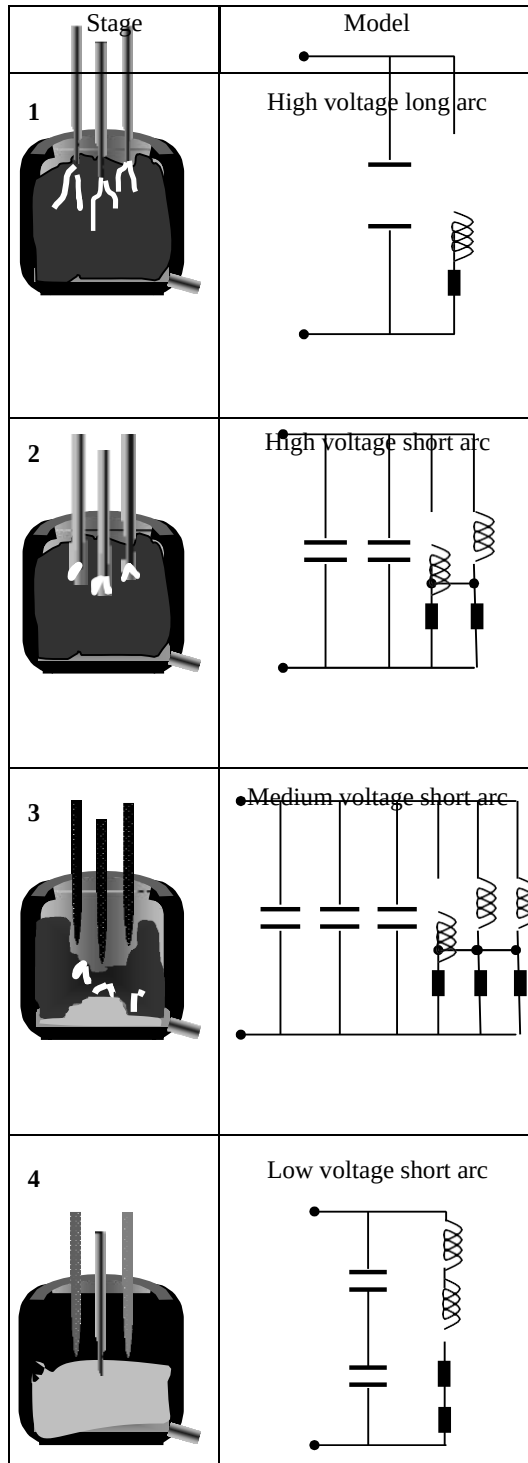


Рис.8. Предложена модель ЭДП для каждой стадии плавания

Основная часть проблем с качеством электроэнергии возникает на этапах 1 и 2 из-за физического перемещения и осаждения отходов.

Неравномерность формы волны напряжения вызвана резким включением [5] и прерыванием тока, что обеспечивает источник гармонических токов “Рис. 9а и б”. Таким образом, волны напряжения и тока значительно отклоняются от симметричной синусоидальной формы.

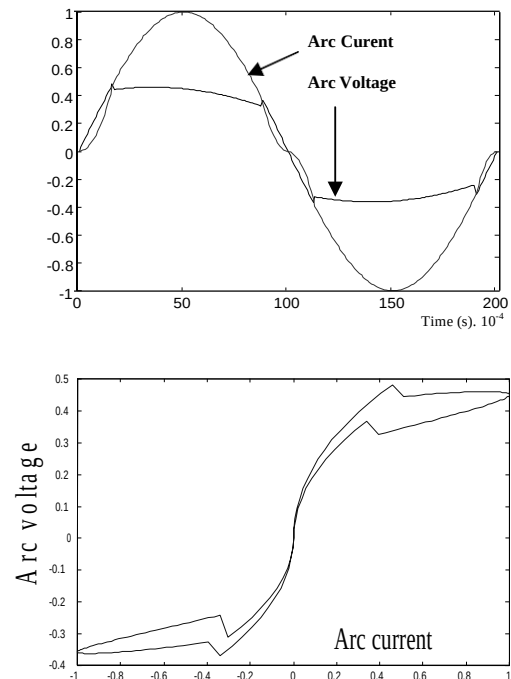


Рис.9. Временное и [IV] представление тока и напряжения электрической дуги [5].

На рисунке 9 мы наглядно показываем нелинейную нагрузку при работе ЭДП, когда напряжение питания и ток не имеют одинаковой формы, и это приводит к возникновению гармоник.

Итак, мы предлагаем заменить электрическую энергию химической, такой как природный газ, и ЭДП будет снабжаться электричеством только на этапах 3 и 4.

Поскольку на этапе 3 электрическая дуга удлиняется за счет увеличения напряжения, ток становится очень хаотичным и не линейным. Но на этапе 4 длина дуги равна, в этом случае напряжение будет изменяться.

2. Заключение

Этот анализ приводит к выводу, что дуга ведет себя таким образом, что все характеристики дуги контролируются расширением дуги, которое является основным признаком, используемым для физического описания дуги

поведение. Расширение дуги видно по форме дуги, которая определяется как область, в которой происходит проводимость электричества. Форма дуги зависит от: плотности тока, плотности магнитного потока, электропроводности, электрического потенциала и температурных полей.

Предложенная модель раскрывает новый параметр дуговой электропечи, которым являются емкости. Благодаря непрерывной регулировке положения электрода, интеграции этой модели в контур регулирования, уменьшаются действия оператора; таким образом, уменьшается количество человеческих ошибок из-за визуальной оценки, а затем эта автоматизация позволяет нам лучше управлять энергией, за счет чего снижается потребление (кВтч/тонна).

Эмпирические соотношения конденсатора и индуктивности печи позволяют нам избежать некоторых очень опасных колебаний тока и напряжения, которые нарушают работу соседних нагрузок. Наша рекомендация сталелитейщикам - заменить электрическую энергию на стадии 1 и 2 химической из-за ограничений по качеству электроэнергии.

Список литературы:

- [1] T. Zheng and E.B. Makram, "An adaptive arc furnace model," in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000, pp. 931-939.
- [2] O. Ozgun and Ali Bur, "Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies," Power Engineering Society Summer Meeting, 1999 IEEE, pp.507-511, July 1999.
- [3] R. Collantes-Bellido, and T. Gomez, "Identification and Modeling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation," IEEE T.P.D., Vol. 12, pp. 1812-1817, October 1997.
- [4] H. Schau, D. Stade, "Mathematical modeling of three-phase arc furnaces". In Proceedings of the IEEE-ICHPS II, Bologna, September 1994, pp 422-428.
- [5] A. E. Emanuel, J.A: Orr "An Improved Method of Simulation of the Arc Voltage-Current Characteristic", 9th international Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings p.p. 148-150, October 1-4, 2000, Orlando, Florida.
- [6] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo and P.Varilone, "Chaos-based modelling of DC arc furnaces for power quality issues," in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, October 2004, pp. 1869-1876.
- [7] E.A. Cano Plata, H.E. Tacca, "Arc furnace modelling in ATPEMTP," International Conference on Power Systems Transients IPST'05, Montréal, Canada, 2005.
- [8] B. Boulet, G. Lalli and M. Ajersch, "Modelling and control of an electric arc furnace," in Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, 2003, pp. 3060-3064.
- [9] K. Timm, "Circle diagram of AC-Furnaces," Electrical Engineering of Arc Furnaces Symposium, Kehl, Germany, 18-21 April 2005.
- [10] M. Sakulin: "Simulation of electric arcs in melting furnaces", BNCE – Electroheat for Metals Conference, Ber. 1.4, Cambridge, 1982.
- [11] D. Andrews, M.T. Bishop and J.F. Witte, "Harmonic measurements, analysis and power factor correction in a modern steel manufacturing facility," in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.3, May/June 1996, pp. 617-624.
- [12] H.M. Peterson, R.G. Koch, P.H. Swart and R. Van Heerden, "Modelling arc furnace flicker and investigating compensation techniques," IEEE Proceedings of Industrial Applications Soc. Annu. Meeting, Vol. 2, 1995, pp. 125-128.