

직류 전기아크로를 제어하기 위한 전원장치로서의 AC/DC 공진형 컨버터

유병우, 최재호, Jaan Jarvik*
충북대학교, Tallinn Technical University*

AC/DC Resonant Converter to Control for DC Arc furnace

Byoung-woo Ryu, Jae-ho Choi, Jaan Jarvik*
Chungbuk National University, Tallinn Technical University*
(82 Kopli Str, EE10412, Tallinn, Estonia)

ABSTRACT

본 논문에서는 직류 전기아크로의 전원장치로서 AC/DC 공진형 컨버터가 묘사된다. 또한 무효전력을 보상하기 위한 커패시터와 인덕터를 각각 직렬과 병렬로 연결되어 있다. 그러므로 무부하부터 단락회로까지의 범위에서 역률이 매우 높다. 이 컨버터는 직류 아크로의 전원장치로서 매우 적당하다.

1. 서 론

최근에, 전기 아크로(Electric Arc furnace, EAF)는 철강산업에서 점점 많이 사용되어진다. 이러한 형태의 전기 아크로가 수직으로나 크기면 으로나 증가하는 이유는 EAF가 상대적으로 간단하고, 높은 효율의 열원이기 때문이다. 하지만 AC EAF는 전력계통에서의 전력품질을 저하시키는 전압 플리커(Voltage Flicker)를 발생시키는 주 원인이 된다. 이러한 전력품질 문제를 보상하기 위하여 무효전력보상기나 다른 종류의 보상기 그리고 필터의 도입으로 인하여 가격이 높아진다.^[1]

그래서, 직류아크로가 다음과 같은 이점 때문에 도입되었다. 그것은 노이즈의 감소, 전극봉 소비의 감소, 설치용량의 증가, 계통전류 고조파를 쉽게 예측 할 수 있다는 점이다. 하지만 단점으로는 AC/DC 컨버터의 설치 등으로 초기투자비용이 증가하는 점이 있지만, 전력용 소자의 개발과 저가 소자의 사용으로 가능해진다.^{[2][4]}

전기아크로는 전력계통에 대하여 부하로서 분명한 요구를 가지고 있다. 아크의 안정성을 확보하기 위하여, 전원공급장치의 전압은 시간에 대해 매우 빠르고 불규칙적인 아크 변수에 대응하여야 한다. 순간적으로 아크에서 필요로 하는 전압보다 더 큰 전원공급장치의 전압이 공급된 경우에는, 아크의

동적저항은 0에 가까워지기 때문에 전류는 빠르게 증가할 것이다. 전류증가는 사이리스터 정류기에 의하여 억제되어질 수 있다. 제어되는 사이리스터에 의하여, 아크전류는 단락회로를 포함한 모든 모드에서 대략적으로 일정하게 유지될 수 있다. 만약 아크의 전압이 변한다면, 또한 유효전력도 변할 것이다. 만약 입력전류의 능동요소가 감소한다면, 출력전류가 일정할 때 일반적인 정류기는 대체로 불변의 계통전류를 가지기 때문에 무효성분이 증가한다. 계통전류의 안정성에도 불구하고, 전압의 요동으로 인하여 전류의 무효성분의 요동이 발생할 것이다. 전압 요동을 제거하기 위하여, 높은 고조파 필터와 빠른 무효전력보상기의 사용이 필요하다.^[3]

본 논문에서는 아크로의 전원공급장치인 무효전력을 보상하는 AC-DC 컨버터를 제안하였다. 무효전력을 보상하기 위한 커패시터와 인덕터를 각각 직렬과 병렬로 연결되어 있다. 그러므로 무부하부터 단락회로까지의 범위에서 역률이 매우 높다. 이 컨버터는 직류 아크로의 전원장치로서 매우 적당하다.

2. 본 론

2.1 전기아크로의 전원공급장치

그림 1은 직류 아크로의 전원공급장치로서 삼상 공진형컨버터의 회로를 보여주고, 아크로전압과 아크로전류를 제어하는 자동제어회로가 나타나 있다. 삼상 변압기는 2차권선이 분리되어있고, 각 상은 두 개의 2차권선(W2, W3)이 직렬로 연결되어있다. 각 상은 전압에 지연된 (I_{L1}) 전류, 권선 W2와 리액터 L1으로 형성한 위상변위 회로를 가진 컨버터를 가진다. 권선 W3과 capacitor C는 전압에 진상인 (I_c)전류로 또 다른 위상변위회로를 형성한다. 권선 W2와 W3의 중성점 m은 추가적인 리액터 L2를 통해서 정류기 브리지에 연결되어진다.

컨버터의 출력전압 U_d 는 미리 조정해놓은 전압 U_{ds} 와 비교된다. 전극의 위치를 제어하는 성분으로부터 발생된 에러신호 ΔU_d 는 전극의 lifting-lowering 장치를 제어한다. 전극을 올리면 아크는 더 길어질 것이고, 대략적으로 아크전압은 아크의 길이에 비례한다. 그러므로 lifting-lowering에 의하여 아크전압을 제어하는 것이 가능하다. 컨버터의 출력전압은 무효성분인 L1, L2, C에서 발생하는 전압강하에 의한 아크전압에 의해서 자동적으로 변화한다. 아크전류는 직렬로 무효성분에 흐른다. 사이리스터는 전압제어에 필요하지 않다. 전원공급장치의 전압제어는 매개변수 적이다. 이것은 사이리스터 제어보다 더 빠르고, 아크 안정성을 유지하기 더 쉽다. 전압제어의 경우에는, 역률은 감소되지 않으며, 고차고조파도 확실히 증가하지 않는다. 제어기능이 없는 경우에서도 제어를 할 수 있는 능력은 특별한 것이다.^[1]

전압에 대해 전류를 독립적으로 제어할 필요가 있는 경우에는, 사이리스터와 전류제어회로로 전류를 독립적으로 제어할 수 있다.

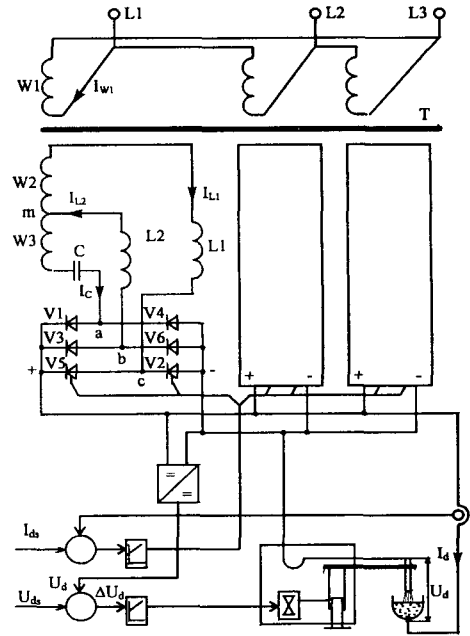


그림 1 직류아크로의 전원공급장치

2.2 공진형컨버터의 특성

아크로를 위한 공진형컨버터의 단상 다이오드 컨버터가 등가적으로 그림 2에 보여진다. 컨버터가 길이가 다른 전기 아크를 부하로 가지기 때문에, 아크를 역기전력으로서 볼 수 있다. 전기아크 전압이 변하기 때문에 컨버터의 출력전류가 변화하므로, 즉, $I_d = f(U_d)$ 가 된다. 역기전력이 변할 때, 계통전류(I_V)와 무효성분을 통하여 흐르는 전류도 변화하게 된다. 그림3에서 I_C 는 Capacitor C를 통하여 흐르는 전류이고, I_{L1} 은 리액터 L1을 통하여 흐르는 전류, I_{L2} 는 reactor L2를 통하여 흐르는 전류이다.

전형적인 다이오드정류기와 비교할 때, 공진형컨버터는 다음의 특징을 가지고 있다.

1) 보편적으로, 계통전류의 최대값은(그림3에서 I_V) 정격값(I_{Vn})과 같다. 보편적으로 단락회로에서 공칭점으로 변화하는 것은, 계통전류가 증가하는 것이 아니라 더 감소하는 것이다. 부하의 변화에 의해, 변압기의 1차측 권선이 과부하 될 수가 없다.

2) 공칭상태에서 단락회로로 변화할 때, 커패시터뱅크(I_C)와 주 인덕터(I_{L1})의 전류가 아주 많이 변하지 않는다.(보편적으로 10-20%) 이것은 커패시터뱅크, 주 인덕터, 변압기 2차측 권선에 과부하가 걸리지 않는다는 것을 의미한다.

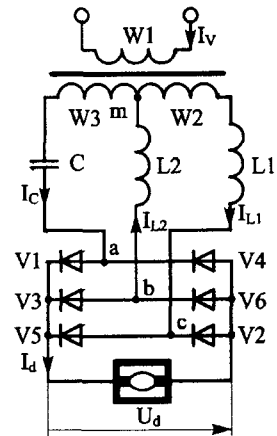


그림 2 두개의 2차권선을 가진 단상 컨버터

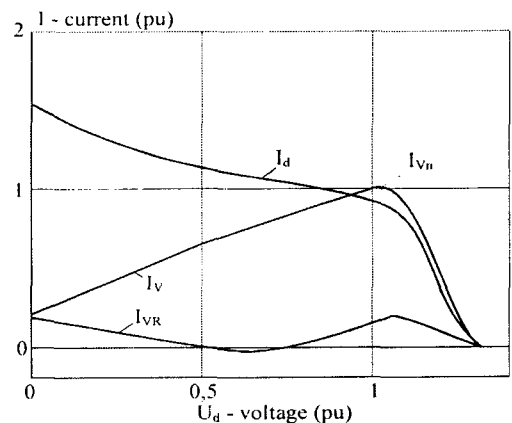


그림 3. 출력전압 U_d 의 함수로서 출력전류(I_d), 계통전류(I_V), 계통전류의 무효성분(I_{VR})

3) 공칭상태에서 단락회로로 변환이 발생할 때, 정류

된 전류(I_d)는 2차측 회로의 전류(I_C , I_{L1})보다 더 증가하지만, I_d 는 여전히 작다(대략적으로 1.7배). 그러한 변화는 전류원의 동작모드에 대하여 일치한다. 공칭 전류(I_{dm})에서 무부하($I_d = 0$)로 변환이 발생할 때, 전압(U_d)은 1.3-1.7배 이상으로 변화하지 않는다. 이것은 전압원의 동작모드에 대하여 일치한다.

4) 계통전류의 무효전류(I_{VR})가 모든 동작모드에서 작다. 공칭전류의 정격에서, 무효성분은 보편적으로 인덕티브이고, 양은 공칭전류의 10-40%이다.

2.3 공진형컨버터의 동작 (Self-adjustment to load)

컨버터의 단상회로가 그림 2에 나타나 있다. 변압기는 직렬로 연결된 두개의 권선(W2, W3)을 가지고 있다. 권선 위상지연회로인 W2와 리액터 L1을 통하여 흐르는 전류(I_{L1})은 전압에 대해 지연되고, 또 다른 위상지연회로인 권선 W2와 커패시터 C를 통하여 흐르는 전류(I_C)는 전압에 대하여 위상이 앞선다. 권선 W2와 W3의 중성점 m 은 정류기 브리지에 추가적인 리액터 L2를 통하여 연결된다. 컨버터의 동작은 전류회로의 특별한 교번하는 구성을 포함하고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 계통전압의 각 반주기에서, 커패시티브 지로 W3, C 와 인덕티브 지로 W2, L1은 부하 변수에 의하여 병렬에서 직렬로 스위치 되고, 그 반대로도 동작한다. 그러므로 그림 4의 (a)는 반주기동안에 커패시터 C와 리액터 L1이 병렬 오실레이팅 회로로 되고, 커패시티브 회로는 W3-C-V1(V4)-arc-V6(V3)-L2-W3 이고, 인덕티브 회로는 W2-L1-V5(V2)-arc-V6(V3)-L2-W2 이다. 병렬 오실레이팅 회로의 커패시티브 인덕티브 회로는 변압기의 1차측 권선 W1을 통하여 연결되어있다. 그림 4의 (b)는 또 다른 반주기의 부분인 커패시터 C와 리액터 L1이 직렬 오실레이팅 회로를 구성하고, W3-C-V1(V4)-arc-V2(V5)-L1-W2-W3으로 연결된다. 병렬에서 직렬로 혹은 직렬에서 병렬로 2차측 권선(W2, W3)의 커패시터와 리액터의 스위칭이 발생한다. 과스위칭은 커패시터 C와 리액터 L1의 전압강하로 인한 것이다. 이런 전압강하의 위상변위의 합은 180° 이고, 전압강하는 2차권선의 전압에 더해진다. 이것은 위상과 크기가 다른 삼상 비대칭 전압시스템이 발생시킨다. 부하전류의 변화로 인한 전압시스템의 변화는, 각 반주기 동안에 다이오드를 동작시켜서 커패시터와 리액터의 병렬연결에 일치하는 정류기 브리지가 생성된다. 병렬과 직렬연결 사이의 비는 변환한다. 부하저항이 작아지고 부하전류가 커질 때, 병렬 연

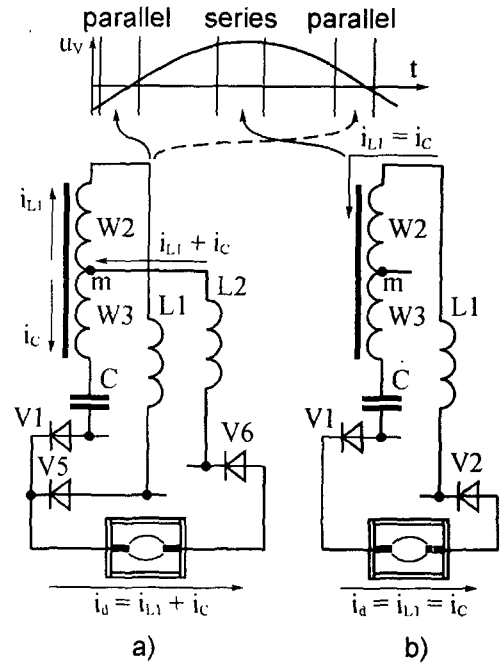


그림 4. 병렬연결과 직렬연결의 변환
a) 병렬연결시 b) 직렬연결시

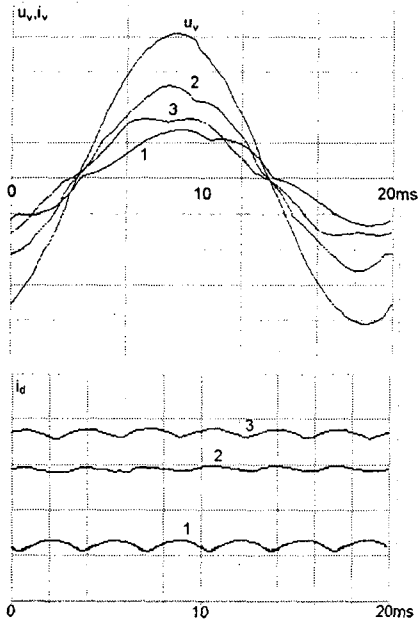
결의 시간이 증가한다. 단락회로에서는 병렬연결이 거의 100%이다. 그러나 부하가 작을 때는 직렬연결이 거의 100%가 된다.

병렬 오실레이팅 회로는 커패시터와 인덕터의 전류사이의 위상차가 180° 를 가진다. 또한 그러한 위상변위는 변압기 2차권선(W2, W3)의 전류사이에 있고, 일차전류의 감소를 발생시킨다. 이런 과정은 컨버터의 무효전력 병렬보상으로 볼 수 있다. 이 과정에서, 2차권선 전류의 무효성분은 서로서로 보상한다. 커패시터와 인덕터가 직렬로 연결된 경우에는 커패시터와 리액터의 전압강하가 서로 보상한다. 이것은 컨버터의 무효전력 직렬 보상과 일치한다. 직렬과 병렬 무효전력보상에 의하여, 컨버터의 역률은 모든 모드에서 높아서 공칭모드에서는 거의 0.99가 된다.

무부하에서 단락회로로 변환에 의해서, 컨버터의 입력과 출력전류의 비가 매우 변한다.(약 10배) 공칭모드에서, 부하에 공급되는 전력은 부하변동의 경우에서도 거의 일정하게 될 것이다

아크전압이 변화할 때, 병렬연결과 직렬연결 사이의 비율은 아주 잘 변화한다. 컨버터의 동작모드는 아크전압에 대하여 self-adjusting 이다. self-adjustment의 범위는 무부하에서 단락회로이다. 게다가 단락회로 전류 제한에서, 부하에 대한 self-adjustment는 전압이 공칭전압 이하로 낮아질 때 좀더 많은 전류를 요구하는 부하의 경우에 유용하다. 변압기 권선은 전형적인 정류기와 같이 최대 부하전류에 대하여 설계될 필요가 없고, 변압기의 설치용량도 더 줄어들 것이다.

3. 결 과



1	$U_d = 1.2$	$I_d = 0.43$
2	$U_d = 1.0$	$I_d = 1.00$
3	$U_d = 0.5$	$I_d = 1.27$

그림 5. 출력전압의 변화에 따른
(a) 계통전류 (b) 컨버터 출력전류

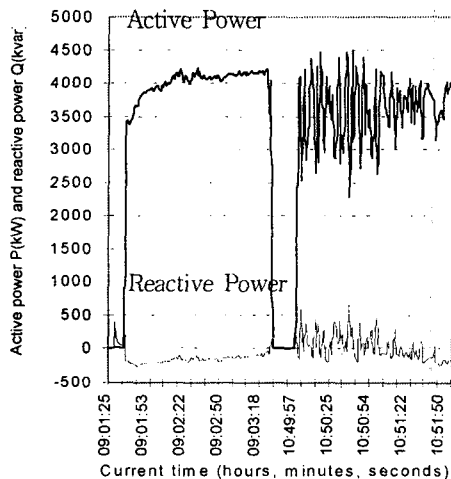


Fig. 6. 공진형컨버터 동작시의 유효전력과 무효전력

그림 5는 아크전압을 3개로 다르게 주었을 때의 컨버터의 AC와 DC 축의 전류파형이 나타나 있다. 선간전압 (U_V)에 의하여 계통전류의 위상은 아크전압이 변함에 따라 아주 조금 변화한다. 계통전류의 파형의 형태가 매우 좋다. 정류된 전류의 리플이 작아서, 공칭모드에서 5%가 되지 않는다

그림 6에는 공진형 컨버터를 가진 전원공급장치가 두개의 다른 모드에서 동작할 때의 유효전력과 무효전력의 변화를 나타낸다. 첫 번째 모드는 2분동안 철조각을 녹이기 시작하는 것을 나타낸다. 전형적인 전원공급장치와 비교해 보면, 유효전력과 무효전력의 요동이 매우 작고, 무효전력의 양도 또한 매우 적다. 두 번째 모드는 산소가 더해져서 녹이는 부분이 나타난다. 이것은 녹은 금속이 "boiling"을 발생시킨다. 금속의 Boiling 부분은 전극과 녹은 금속사이에 다양한 단락을 발생시킨다.

그러므로 유효전력의 요동은 매우 높게 된다. 동시에 발생하는 무효전력의 요동은 대단히 작게 된다.(유효전력의 평균값에 약 20%정도)

4. 결 론

전기아크로는 비선형·시변특성을 가지고 있는 가장 대표적인 부하이다. 교류 아크로에 비하여 직류아크로는 초기 설치비용이 컨버터의 사용으로 인하여 가격이 높아지지만, 노이즈의 감소, 전극봉 소비의 감소, 설치용량의 증가, 계통전류 고조파를 쉽게 예측, 무효전력을 컨버터에서 보상할 수 있다는 점에서 큰 이점이 있다. 본 논문에서는 직류아크로를 위한 self-adjusting을 갖는 공진형컨버터가 비선형적이고 대전력을 요구하는 전기아크로에 대하여 안정적으로 동작한다. 또한 이 공진형컨버터는 무효전력의 보상을 통하여 플리커나 고차고조파의 문제를 해결한다. 역률은 공칭모드에서 약 0.99로 매우 높고, 변동하는 부하에서 무효전력은 매우 작게 증가한다.

참 고 문 헌

- [1] K.Janson and J.Jarvik, "AC-DC converter with parametric reactive power compensation", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, pp. 554-562, June 1999.
- [2] Javier Arturo del Rio, "Analysis of electric arc stability in AC and DC arc furnace by using a basis transformed state space approach", M.D. thesis Toronto University, Toronto, Canada, 1989.
- [3] M.Wurstein, J.Du Parc and C.Glinski, "Converters with low disturbances for the electric power supply of DC furnaces", *Proceedings of the 5th European Electric Steel Congress*, Paris, 1995
- [4] D.Stade, A.Novitskiy and I.Aprelkov, "Simulation System for Computing of flicker and harmonics from DC. electric arc furnaces", *Proceedings of Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability* June 1999, Sagadi, Estonia, pp. 90-95.