

직류 전기아크로를 제어하기 위한 전원장치로서의 AC/DC 공진형 컨버터

柳炳宇*, 崔載昊, Jaan Jarvik

AC/DC Resonant Converter to Control for DC Arc furnace

Byoung-woo Ryu, Jae ho Choi, and Jaan Jarvik

요 약

전력품질 문제를 해결할 때 직류전기아크로의 전원장치로서 높은 역률을 갖는 컨버터가 요구된다. 본 논문에서는 계통전압의 각 주기에서 커패시터와 인덕터의 공진회로가 부하변수에 따라서 직렬연결상태에서 병렬연결상태로, 혹은 그 반대로 전환하면서 고역률을 유지하는 50(60)Hz 교류에서 직류로 변환하는 공진형컨버터가 묘사된다. 직렬연결과 병렬연결의 기간과 변환비는 부하에 따라서 결정되며 병렬 공진회로는 단락회로를 제한한다. 이 공진형컨버터는 무부하에서 단락회로의 범위까지 높은 역률을 가지며 아크로에 전원공급을 하는 장치로 매우 적당하다.

ABSTRACT

When solving the problems of electric power quality the converters with high power factor are useful for the DC arc furnace power supply. In this paper, resonant converters of 50(60) Hz AC to DC are described, where in each period of network voltage the capacitor and inductor of an oscillatory circuit are switched from series into parallel and vice versa parametrically. The duration of series and parallel connection and also the transformation ratio are dependent on load. Parallel oscillatory circuit restricts the short circuit current. These converters have high power factor from no-load to short-circuit and fit very well to supply arc furnaces.

Key Words : DC Arc Furnace, Resonant Converter, Power factor, Reactive power compensation

1. 서 론

최근에 이르러 전기아크로(Electric Arc furnace)는 철강산업에서 상대적으로 간단하고 높은 효율의 열원이기 때문에 점점 많이 사용되어 지고 있다. 철강생산 증가율이 전반적으로 줄어들고 있음에도 전기아크로의

용량은 현재 늘고 있는 추세이다. 하지만 아크로는 전력계통에서 가장 민감하고 불안한 부하로 취급되고, 그 이유는 아크로가 무효전력의 발생뿐만 아니라 여러 가지 전력품질문제의 원인이 되기 때문이다¹⁾.

전기아크로는 입력전원의 종류에 따라 교류아크로와 직류아크로로 구분되어진다. 교류아크로는 직류아크로에 비해 비교적 간단한 구조와 설치시 저비용이라는 장점은 가지지만, 전력계통에서의 전력품질을 나쁘게 하는 전압 플리커(Voltage Flicker)의 발생에 주원인이 된다. 이러한 전력품질 문제를 보상하기 위하여 무효전력보상기나 다른 종류의 보상기, 그리고 고조파를 제거하기 위한 필터를 설치하여야 하는데 이에 기인하

*충북대학교 전기전자공학부 박사과정

E-mail : bwyu@power.chungbuk.ac.kr

접수일자 : 2002. 7.25

1차심사 요청일 : 2002. 7.30

심사완료일 : 2002.10.21

여 총체적인 설치비용은 높아진다^[2]. 반면에 직류아크로는 교류를 직류로 변환하기 위하여 컨버터가 필요하고 이로 인하여 초기 설치비용이 증가하는 단점이 있지만, 최근에는 전력용 소자의 개발과 저가 소자의 사용으로 비용을 감소시킬 수가 있다. 그리고 노이즈가 감소하고 전극봉 소비가 감소하며 설치용량이 증가하고 계통전류 고조파를 쉽게 예측 할 수 있다는 장점을 가지고 있다^{[2][3]}.

전력계통에서 전기아크로의 부하상태는 무부하 모드에서 단락회로모드의 범위까지 비선형적이고 불규칙적인 부하이다. 이것은 아크로에서 아크가 발생하여 금속을 녹일 때에 각 전극봉에서 발생하는 아크가 단락회로상태로 되기 때문이다. 이로 인하여 아크로의 전원장치는 설치용량이 다른 부하에 비하여 크므로 아크로의 전원장치 설계를 할 때에는 설치용량을 줄여야 하는 문제가 발생한다. 전기아크로의 전원장치는 아크의 안정성을 확보하기 위하여 전원공급장치의 전압이 시간에 대해 매우 빠르고 불규칙적인 아크 변수에 대응할 수 있어야 된다. 순간적으로 아크에서 필요로 하는 전압보다 더 큰 전원공급장치의 전압이 공급되면 아크의 동적저항은 0에 가까워지기 때문에 전류는 빠르게 증가할 것이다. 전류증가는 사이리스터 정류기에 의하여 억제할 수 있다. 사이리스터에 의하여, 아크전류는 단락회로모드를 포함한 모든 모드에서 대략적으로 일정하게 유지될 수 있다. 만약 아크의 전압이 변한다면 또한 유효전력도 변할 것이다. 또한 입력전류의 능동요소가 감소한다면 출력전류가 일정할 때 전형적인 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][4]}. 직류아크로를 위한 전원장치로는 6펄스 사이리스터 제어정류기와 12펄스 사이리스터 제어정류기가 많이 사용되어진다. 하지만 사이리스터 제어정류기를 사용하면 무효전력이 발생하고 고조파가 발생하여 전력계통으로 유입되는 문제가 발생한다^[5].

본 논문에서는 직류아크로의 전원공급장치로 무효전력을 보상하는 AC-DC 공진형컨버터를 제안하였다. 무효전력을 보상하기 위하여 커패시터와 인덕터를 각각 직렬과 병렬로 연결하여 자체조절 기능을 갖는 공진형컨버터가 비선형적이고 대전력을 요구하는 전기아크로에 대하여 안정적으로 동작함을 보인다. 전류제어는 추가적인 사이리스터를 이용하여 독립적으로 제어

할 수가 있다. 또한 이 공진형컨버터는 무효전력의 보상을 통하여 플리커나 고차고조파의 문제도 해결한다. 그러므로 무부하부터 단락회로까지의 범위에서 역률이 매우 높다. 이 컨버터는 직류 아크로의 전원장치로서 매우 적합함을 증명한다.

2. 전기아크로의 전원공급장치

그림 1은 본 논문에서 제안한 직류 아크로의 전원공급장치로서 공진형컨버터의 회로를 보여준다. 그리고 제어장치로서는 아크로전압과 아크로전류를 제어하는 자동제어회로가 나타나 있다. 삼상변압기는 2차권선이 분리되어있고 각 상은 두 개의 2차권선인 W2와 W3으로서 직렬로 연결되었다. 각 상은 권선 W2와 리액터 L1로 구성된 위상변위회로와 권선 W3과 C로 구성된 위상변위회로를 갖는다. 전자는 지연전류 I_{L1} 이 흐르고 후자는 진상전류 I_C 가 흐른다. 권선 W2와 W3의 중성점 m은 추가적인 리액터 L2를 통해서 정류기 브리지에 연결된다. 컨버터의 출력전압 U_d 는 미리 지정해놓은 전압 U_{ds} 와 비교된다. 전극의 위치를 제어하는 성분으로부터 발생된 에러신호 ΔU_d 는 전극의 상하이동장치를 제어한다. 전극을 올리면 아크는 더 길어질 것이고 대략적으로 아크전압은 아크의 길이에 비례한

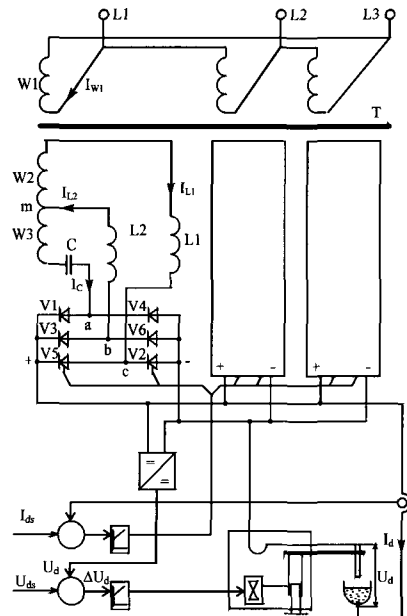


그림 1 직류아크로의 전원공급장치
Fig. 1 DC arc furnace power supply

그러므로 상하이동 동작에 의하여 아크전압을 제어하는 것이 가능하다. 컨버터의 출력전압은 무효성분인 L1, L2, C에서 발생하는 전압강하에 의한 아크전압에 의해서 자동적으로 변화한다. 아크전류는 직렬로 무효성분에 흐른다. 사이리스터는 전류제어에만 관여하고 전압제어에는 필요하지 않다. 전원공급장치의 전압제어는 부하의 변수에 의존하고 이것은 사이리스터 제어보다 더 빠르고 아크 안정성을 유지하기 더 쉽다. 전압제어의 경우에는 역률은 감소하지 않으며 고차고조파도 확실히 증가하지 않는다.

전압에 대해서 전류를 독립적으로 제어할 필요가 있는 경우에는 사이리스터를 이용한 전류제어회로가 전류를 독립적으로 제어할 수 있다.

3. 공진형컨버터의 특성과 동작

3.1 공진형컨버터의 동작

컨버터의 단상회로가 그림 3에 나타나 있다. 변압기는 직렬로 연결된 두개의 권선 W2와 W3을 가지고 있다. 권선 W2와 리액터 L1을 통하여 흐르는 전류 i_{L1} 은 전압에 대해 위상이 뒤지고, 권선 W3과 커패시터 C를 통하여 흐르는 전류 i_C 는 전압에 대하여 위상이 앞선다. 권선 W2와 W3의 중성점 m은 정류기브리지에 추가적인 리액터 L2를 통하여 연결된다. 컨버터의 동작은 전류회로가 교번하는 구성을 포함하고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 계통전압의 각 반주기에서 용량성지로 W3, C와 유도성지로 W2, L1은 부하의 요구에 의하여 병렬연결상태에서 직렬연결상태로 전환되거나 그 반대로 직렬연결상태에서 병렬연결상태로 전환하여 동작한다. 그러므로 그림 2의 (a)는 반주기동안에 커패시터 C와 리액터 L1이 병렬 공진 회로를 구성하고 전류의 흐름은 W3-C-V1(V4)-arc-V6(V3)-L2-W2로 되며 아크에 흐르는 전류 i_a 는 i_{L1} 과 i_C 의 합으로 된다. 그림 2의 (b)는 반주기동안에 커패시터 C와 리액터 L1이 직렬 공진 회로를 구성하고 전류의 흐름은 W3-C-V1(V4)-arc-V2(V5)-L1-W2-W3으로 되며 아크에 흐르는 전류 i_a 는 i_{L1} 과 i_C 와 같다. 이러한 회로의 전환은 커패시터 C와 리액터 L1의 전압강하로 인한 것이다. 이런 전압강하의 위상변위의 합은 180° 이고, 전압강하는 2차권선의 전압에 더해진다. 이것은 위상과 크기가 다른 삼상 비대칭 전압시스템을 발생시킨다.

부하전류의 변화로 인한 전압시스템의 변화는 각 반주기 동안에 다이오드를 동작시켜서 커패시터와 리액터의 병렬연결에 일치하는 정류기 브리지가 생성된다. 병렬연결과 직렬연결 사이의 비는 부하에 따라 변화한다. 부하저항이 작아지고 부하전류가 커지면 병렬공진상태로 동작하며 단락회로에서는 병렬공진동작이 거의 100%이다. 그러나 부하가 작을 때는 직렬공진동작이 거의 100%가 된다. 병렬공진회로는 커패시터와 인덕터의 전류사이의 위상차가 180° 를 가진다.

또한 위상변위는 변압기 2차권선 W2와 W3의 전류사이에 존재하고 일차전류의 감소를 발생시킨다. 이런 과정을 컨버터의 무효전력 병렬보상으로 볼 수 있다. 이 과정에서, 2차권선 전류의 무효성분은 서로서로 보상한다.

커패시터와 인덕터가 직렬로 연결된 경우에서는 커패시터와 리액터의 전압강하가 서로 보상한다. 이것은 컨버터의 무효전력 직렬보상과 일치한다. 직렬과 병렬 무효전력보상에 의하여 컨버터의 역률은 모든 모드에서 높고 공칭모드에서는 거의 0.99가 된다.

무부하에서 단락회로로 변화할 때, 컨버터의 입력전류와 출력전류의 비가 약 10배로 매우 변한다.

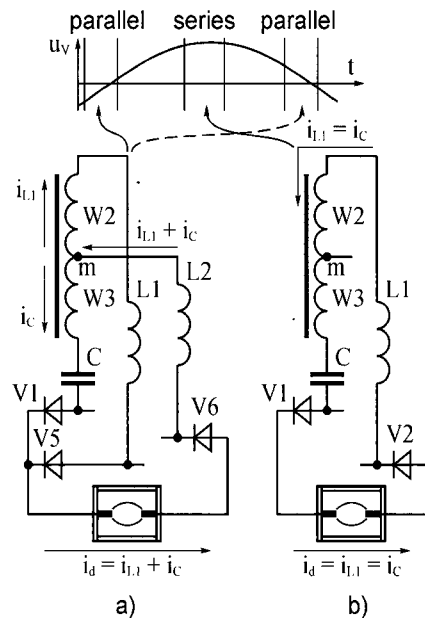


그림 2 병렬연결과 직렬연결의 변환
 (a) 병렬연결시 (b) 직렬연결시
 Fig. 2 Alternation of parallel (a) and series (b) connection of phase-shifting circuits W2, L2 and W3, C

공칭모드에서는 부하에 공급되는 전력이 부하변동의 경우에서도 거의 일정하게 될 것이다. 아크전압의 변화에 대하여 병렬연결과 직렬연결 사이의 비율이 매우 잘 대치한다. 컨버터의 동작모드는 아크전압에 대하여 자체조절기능을 갖는다. 자체조절기능의 범위는 무부하상태에서 단락회로까지이다. 게다가 부하에 대한 자체조절기능은 전압이 공칭전압 이하로 낮아지고 좀더 많은 전류를 요구하는 부하의 경우에 유용하다. 변압기 권선은 전형적인 정류기에 비해 최대부하전류에 대하여 설계될 필요가 없고 변압기의 설치용량도 더 줄어들 것이다.

3.2 공진형컨버터의 전류특성

직류아크로를 위한 공진형컨버터의 단상 다이오드컨버터의 등가모델을 그림 3에 나타내었다. 직류아크로는 아크의 길이와 아크전압이 비례하고 무부하상태에서 단락회로상태까지 동작한다. 대략적으로 동작상태 구분하면 단락회로 상태 $U_d = 0$ 와 공칭동작상태 $U_d = 1$ 로 구분지어 분석한다. 공진형컨버터는 길이가 다른 전기아크를 부하로 가지기 때문에 아크를 역기전력으로서 볼 수 있다. 전기아크전압이 부하의 변동에 의하여 변화하기 때문에 컨버터의 출력전류가 변화하므로 $I_d = f(U_d)$ 가 된다. 역기전력이 변할 때 계통전류 I_v 와 무효성분을 통하여 흐르는 전류도 변화하게 된다. 그림 4에는 그림 3에서의 단상등가모델을 이용하여 컨버터의 출력전압인 아크전압을 함수로 하여 각 부분에 흐르는 전류를 시뮬레이션을 통하여 나타내었다. 여기서 I_C 는 커패시터 C를 통하여 흐르는 전류이고 I_{L1} 은 리액터 L1을 통하여 흐르는 전류이며 I_{L2} 는 리액터 L2를 통하여 흐르는 전류이다. 각 부분에 흐르는 전류를 기초로 하여 전형적인 다이오드 정류기와 비교하면 공진형컨버터에 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 그림 4에서 계통전류 I_v 의 최대값은 정격값 I_{vn} 과 같다. 보편적으로 단락회로에서 공칭동작점으로 변화하는 것은 계통전류가 증가하는 것이 아니라 감소하는 것이다. 그러므로 부하의 변화에 의해서 변압기의 1차측 권선이 과부하가 될 수 없다.
- 2) 공칭동작상태에서 단락회로로 변화할 때, 커패시터뱅크전류 I_C 와 주인덕터전류 I_{L1} 이 약 10-20% 정도로 아주 많이 변하지는 않는다. 이것은 커패시터뱅크, 주인덕터, 변압기 2차측 권선에 과부하가 걸

리지 않는다는 것을 의미한다.

- 3) 공칭동작상태에서 단락회로로 변환이 발생할 때, 정된 전류 I_d 는 2차측 회로의 전류 I_C, I_{L1} 보다 더 증가하지만, I_d 는 여전히 작고, 대략적으로 1.7배이다. 그러한 변화는 전류원의 동작모드에 대하여 일치한다. 공칭전류 I_{dn} 에서 무부하인 $I_d = 0$ 으로 변환이 발생할 때, 전압 U_d 는 1.3 - 1.7배 이상으로 변화하지 않는다. 이것은 전압원의 동작모드에 대하여 일치한다.

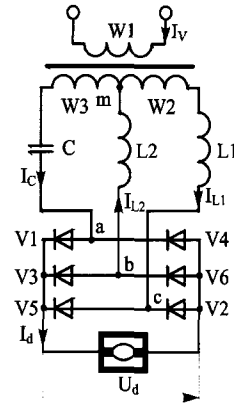


그림 3 두개의 2차권선을 가진 단상 컨버터
Fig. 3 One-phase converter with two secondary winding

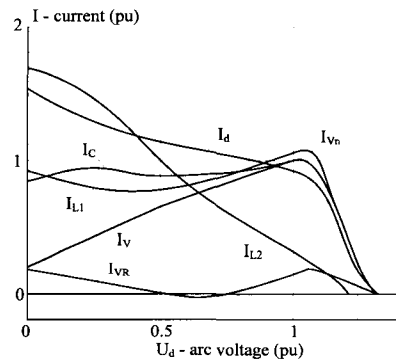


그림 4 출력전압 U_d 의 함수로서 출력전류 (I_d), 계통전류 (I_v), 커패시터전류 (I_C), 주인덕터전류 (I_{L1}), 추가적인 인덕터전류 (I_{L2})

Fig. 4 The output current (I_d), network current (I_v), capacitor bank I_{L1} current (I_C), current of the main inductor (I_{L1}) and additional inductor (I_{L2}) as a function of the arc voltage U_d of the converter with a single-phase diode-rectifier

4) 계통전류의 무효전류 I_{VR} 은 모든 동작모드에서 작다. 공칭전류 정격에서 무효성분은 보편적으로 유도성이고, 양은 공칭전류의 10-40%이다.

3.3 사이리스터로 부분적인 전류제어

그림 1에서 다이오드 V2와 V5를 사이리스터로 대체함으로써 전류제어가 부분적으로 가능하게 된다. 그림 5에는 사이리스터를 이용하여 부분적으로 전류제어를 시행한 결과가 보이고 있다. 사이리스터의 점호각을 변화시킴에 따라 출력전류와 피상전력, 유효전력, 무효전력, 그리고 입력전류인 계통전류의 5차고조파에 대한 결과가 나타나 있다.

그림 5(a)에서는 사이리스터로 전류를 부분적으로 제어하면, 계통전류의 전류고조파가 변화한다. 5차고조파는 6%에서 7.7%까지 조금 증가한다. 다른 고조파는 전혀 증가하지 않는다.

그림 5(b)에서는 피상전력과 유효전력이 각각의 점호각에 따라 변화하는 값이 나타나 있다. 점호각이 0° 일 때는 피상전력과 유효전력이 같지만 점호각이 커짐에 따라 피상전력과 유효전력의 차가 커짐을 알 수 있다. 부분적으로 사이리스터를 이용하여 전류를 제어할 수는 있지만 점호각이 커짐에 따라 무효전력이 발생함을 나타낸다.

그림 5(c)에서 사이리스터로 부분적으로 전류제어를 하게 되면 무효전력 Q는 증가한다. 공칭 아크 전압의 점호각 α 를 75°로 사용될 때 무효전력이 최대이다. 하지만 무효전력 Q의 최대값은 여전히 정격전력 P_n 보다 3배 미만이다. 최대무효전력이 보통의 사이리스터정류기보다 매우 적다.

그림 5(d)에서, 만약 아크 전압 U_d 가 공칭전압 U_{dn} 의 절반보다 크다면 $U_d > 0.5U_{dn}$, 공칭동작점의 절반까지 전류를 감소할 수가 있다.

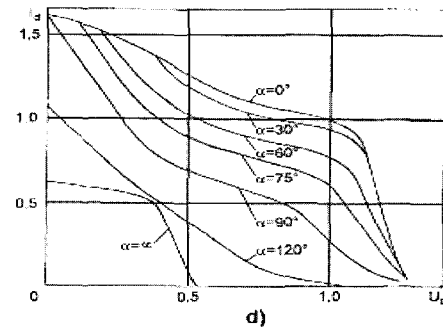
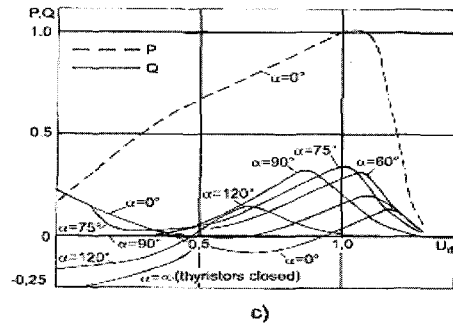
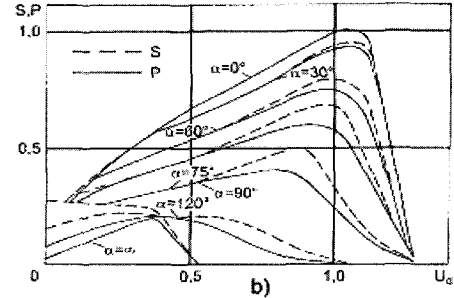
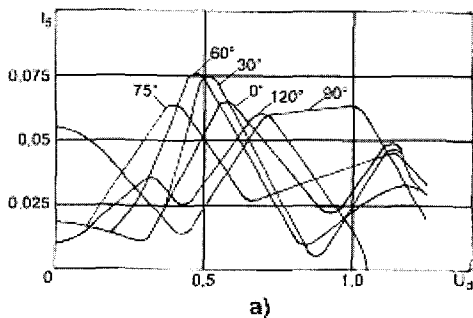


그림 5 다른 사이리스터 점호각의 경우에 아크전압의 함수로서 전원공급장치 파라미터의 변화
 (a) 계통전류의 5차 고조파
 (b) 피상전력 S와 유효전력 P
 (c) 유효전력 P와 무효전력 Q
 (d) 정류된 전류 I_d

Fig. 5 Variation of the power supply parameters as a function of the arc voltage U_d in case of different thyristor firing angles
 (a) The 5-th harmonic in the network current
 (b) Apparent power S and active power P
 (c) Active power P and reactive power Q
 (d) Rectified current I_d

4. 공진형컨버터의 설계

4.1 컨버터 파라미터 분배계수

그림 1에서 W2와 W3과 같이 컨버터 변압기의 한 상은 두 개의 2차권선을 포함한다. 이러한 권선의 전압은 변압기의 권선비에 따라서 같거나 다르게 선택되어진다. 이 선택은 무부하 전압의 비에 의해서 특성화된다.

$$K_E = \frac{U_{WCO}}{U_{WLO}} \tag{1}$$

K_E 는 컨버터전압의 분배계수이다. 그림 1에서 L1과 L2와 같이, 컨버터의 한 상은 두 개의 리액터를 포함한다. 추가적인 리액터 L2의 유도성 리액턴스와 주 리액터 L1의 유도성 리액턴스의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$K_L = \frac{x_{L2}}{x_{L1}} \tag{2}$$

여기서 K_L 은 인덕턴스 분배계수이고, x_{L2} 는 추가적인 리액터의 유도성 리액턴스이고, x_{L1} 은 주 리액터의 유도성리액턴스이다.

단락회로 모드에서 변압기의 2차권선에서 무효성분 부하는 전체적으로 혹은 부분적으로 보상되어진다. 변압기의 2차권선의 무효전력의 비율에 의해서 특성화되어진다.

$$K_Q = \frac{Q_{LK}}{Q_{CK}} \tag{3}$$

분배계수 K_E , K_L , K_Q 의 값은 시스템의 특성에 따라 선택된다. 이 선택은 컨버터 특성에 영향을 미친다. 같은 회로와 분배계수를 갖는 컨버터는 다른 공칭 전압과 전류를 가지지만 그들은 같은 역률, 출력특성의 형태, 전류의 고차고조파의 같은 양을 가진다.

4.2 설계시 고려할 점

아크로를 위한 공진형 컨버터를 설계함에 있어서 다음의 사항이 고려되어야 한다.

1. 컨버터의 공칭동작전압 U_{dn} 이 대략적으로 변압기의 한 상의 2차권선의 전압의 합과 같아야 한다.

$$U_{dn} \approx U_{WCO} + U_{WLO} \tag{4}$$

2. 변압기의 2차권선에 흐르는 전류는 공칭 동작에

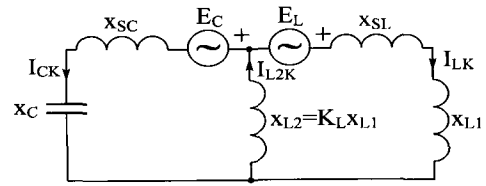


그림 6 무효성분의 값을 구하기 위한 단락회로의 등가회로
Fig. 6 Calculation circuit of the short-circuit mode to find the values of reactive elements

서 단락회로의 변환이 발생할 때와 두드러지게 다르지 않다. 단상 컨버터의 경우에서는, 2차권선의 전류는 또한 컨버터의 공칭전류 I_{dn} 과 거의 같다.

$$I_{dn} \approx I_{WCK} \approx I_{WLK} \tag{5}$$

여기서 I_{WCK} , I_{WLK} 는 단락회로의 경우에 2차권선의 전류이다.

3. 단락회로 모드에 대해서 그림 6에 나타난 등가계산회로를 사용할 수 있다. 정류기브리지는 생략한다. 단락회로상태에서 정류기브리지에서의 전압강하는 약 2V이고 무효성분의 전압강하보다 대단히 작으므로 이러한 전압강하는 무효성분의 전류에 거의 영향을 주지 않는다. 변압기의 일차측으로 환산된 2차전류의 합이 단락회로의 경우에는 이상적인 경우에는 0과 같이 매우 작기 때문에 1차권선과 마그네틱 코어는 무시되어진다. 변압기의 2차권선은 전압원에 의해서 대체되고 2차권선의 유도성 리액턴스의 누설리액턴스는 직렬로 x_{SC} 와 x_{SL} 과 연결된다. 이러한 계산 회로에서의 전류는 정현파이다.

만약 우리가 근사한 수식 (4)와 (5)를 기초로 하여 회로의 전압과 전류를 알 수 있다면 무효성분의 x_C , x_{L1} , x_{L2} 의 근사 리액턴스를 계산할 수가 있다.

4.3 시스템의 상대적인 값

일반적으로 시스템은 공칭동작전류 $I_d=1$ 와 공칭동작전압 $U_d=1$ 을 기본으로 한다.

하지만 위의 계산 방법에서는 전압의 기본이 무부하인 경우에 두 개의 단상 2차권선의 전압의 합으로 사용하는 것이 더 적당하다.

그러므로 기본전압은 변압기의 두 권선의 무부하전압의 합으로 된다.

$$U_B = U_{WCO} + U_{WLO} \tag{6}$$

여기서, U_{WCO} 는 용량성지로의 무부하전압

U_{WLO} 는 유도성지로의 무부하전압

한 상의 기본전력에 대하여, 단락회로 피상전력에서 2차권선의 피상전력은 합은 다음과 같이 정의된다.

$$S_{BP} = U_{WCO} I_{WCK} + U_{WLO} I_{WLK} \quad (7)$$

한 상의 기본전류 I_{BP} 와 기본임피던스 z_{BP} 는 다음과 같이 쓰인다.

$$I_{BP} = \frac{S_{BP}}{U_B} \quad (8)$$

$$z_{BP} = \frac{U_B^2}{S_{BP}} \quad (9)$$

4.4 무효성분의 계산

그림 6의 등가회로를 이용하고 앞에서 주어진 상대적 값을 사용하여 무효성분의 식을 유도할 수가 있다. 주 리액터의 유도성 리액턴스는,

$$x_{L1} = \frac{z_{BP}[K_E(K_Q + 1) - x_{SL}^* \cdot K_E \cdot K_Q(K_E + 1)^2]}{(K_E + 1)^2 [K_E \cdot K_Q(1 + K_L) + K_L]} \quad (10)$$

커패시터의 용량성 리액턴스는,

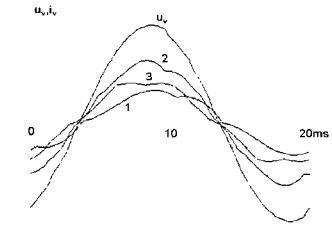
$$x_C = z_{BP} \left[x_{SC}^* + x_{L1}^* \cdot K_L(1 + K_E \cdot K_Q) + \frac{K_E^2(K_Q + 1)}{(K_E + 1)^2} \right] \quad (11)$$

식 (2)를 이용하여 추가적인 리액터의 유도성 리액턴스도 구할 수 있다.

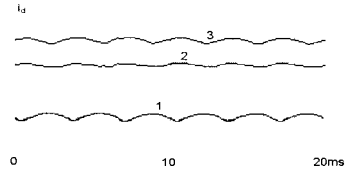
$$x_{L2} = K_L \cdot x_{L1} \quad (12)$$

5. 결과 및 고찰

그림 7에 아크전압을 3개로 다르게 주었을 때, 즉 아크부하의 상태가 3가지 모드일 때의 컨버터의 입력측의 전압과 전류파형과 출력측의 전류파형이 나타나 있다. 그림 7 (a)에서 입력전압 u_v 와 입력전류 i_v 의 위상을 비교하면 부하의 변화에 따라 아주 조금 변화하기는 하나 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 입력전류의 파형의 형태가 매우 좋다. 그림 7 (b)에서 정류된 전류는 리플이 작아서 공칭동작모드 $U_d = 1$ 에서는 맥동률이 5%도 되지 않는다. 결론적으로 입력전압과 전류를 비교하면 아크부하의 변화에 따라 전체 구간의 역률은 0.99가 된다. 그러므로 무효전력은 거의 완전하게 보상이 되고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

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 7 출력전압의 변화에 따른

(a) 계통전류 (b) 컨버터 출력전류

Fig. 7 Waveforms of line current (a) and rectified current (b) at three output voltages at fully opened thyristors

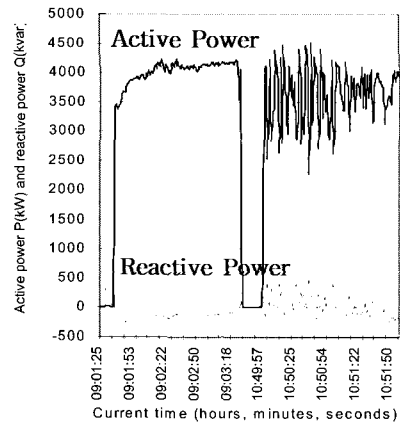


그림 8 공진형컨버터 동작시의 유효전력과 무효전력

Fig. 8 Active and reactive power of power source in operation

그림 8에는 공진형 컨버터를 가진 전원공급장치가 두개의 다른 상태에서 동작할 때의 유효전력과 무효전력의 변화를 나타낸다. 첫 번째 상태는 전기아크로에서 2분 동안 철조각을 녹이기 시작하는 것을 나타낸다. 전형적인 6펄스 사이리스터컨버터와 비교해 보면

유효전력과 무효전력의 요동이 매우 작고 무효전력의 양도 매우 적다. 두 번째 상태는 산소가 첨가되어 녹이는 부분을 나타낸다. 이것은 녹은 금속이 끓는 상태를 발생시킨다. 금속의 끓는 상태는 전극과 녹은 금속 사이에 다양한 단락을 발생시키게 되어 유효전력의 요동이 매우 높게 된다. 하지만 동시에 발생하는 무효전력의 요동은 대단히 작음을 알 수 있다.

6. 결 론

전기아크로는 전력계통에서 비선형·시변특성을 가지고 있는 가장 대표적인 부하이다. 교류 아크로에 비하여 직류아크로는 초기 설치비용이 컨버터의 사용으로 인하여 높아지지만, 노이즈가 감소하고 전극봉 소비가 감소하며 설치용량이 증가하고 계통전류 고조파를 쉽게 예측할 수 있고 무효전력을 컨버터에서 보상할 수 있다는 점에서 큰 이점이 있다.

본 논문에서는 직류아크로의 전원공급장치로 무효전력을 보상하는 AC-DC 직렬형 공진형컨버터를 제안하였다. 대부분의 직류아크로의 전원장치로 사용되는 6펄스나 12펄스 사이리스터컨버터를 사용하게 되면 무효전력이 발생하게 되므로 추가적인 보상장치를 시스템에 연결하여 사용하여야 한다.

그러므로 본 논문에서 제안한 공진형컨버터는 매우 간단한 구조를 가지며 무효전력을 보상하기 위하여 부하상태에 따라 커패시터와 인덕터를 직렬공진상태와 병렬공진상태로 전환하는 부하에 따른 자체조절 기능을 가지며 비선형적이고 대전력을 요구하는 전기아크로에 대하여 안정적으로 동작한다. 또한 이 공진형컨버터는 무효전력의 보상을 통하여 추가적인 보상장치의 사용 없이 플리커나 고조파의 문제를 해결한다. 그러므로 무부하부터 단락회로까지의 범위에서 역률이 매우 높고 역률은 공칭동작상태에서 약 0.99이다. 부하가 변동할 때에도 무효전력은 매우 작게 증가한다. 그리고 아크부하가 단락회로로 되어도 출력전류는 공칭상태의 전류보다 1.7배정도로 커지므로 설치용량을 6펄스 컨버터에 비하여 크게 줄일 수 있는 이점이 있다. 이 컨버터는 직류아크로의 전원장치로서 적당함을 제안한다.

참 고 문 헌

[1] 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.
 [2] 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

[3] K. Janson and J. Jarvik, "AC-DC converter with parametric reactive power compensation", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 46, pp. 554~562, June 1999.
 [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, pp. 90~95, Sagadi, Estonia, June 1999
 [5] Carpinelli, G. Verde, P. Tironi, E. and Zaninelli, D, "AC and DC arc furnaces: a comparison on some power quality aspects", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol. 1, pp. 499~506, 1999.
 [6] 유병우, 최재호, J. Jarvik, "직류 전기아크로를 제어하기 위한 전원장치로서의 AC/DC 공진형 컨버터", 전력전자학회 학술대회 논문집, 2002년.

저 자 소 개



유병우(柳炳宇)

1969년 9월 10일생. 1996년 충북대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 박사과정.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 졸업(석사). 1989년 동 대학원 졸업(박사). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기전자공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998

년 University of Toronto(Visiting Professor). 당 학회 편집이사. Journal of Power Electronics 편집위원.



Jaan Jarvik

He was born in Estonia, in 1939. He received the Dipl. Eng. degree in electrical engineering and Ph.D. degree from Leningrad Polytechnic Institute, Leningrad, U.S.S.R., in 1967 and 1971, respectively. Since 1971, he has been with Tallinn

Technical University. He is a Professor.