

**PWM 방식을 적용한 CEDM 전력공급장치의
기술적 고찰**

**Technical Discussions of CEDM Power Supply
Using PWM Methodology**

허섭, 김동훈, 성승환, 장귀숙, 한재복
대전광역시 유성구 덕진동 150
한국원자력연구소

요 약

CEDM의 전기-기계학적 검토를 토대로 **CEDM** 전력공급장치의 설계인자를 분석하였다. 이를 이용하여 기존 **CEDM** 전력공급장치의 한계에 대해 분석하고 대안으로서 새로운 전력공급장치를 제안하였다. 기존의 **CEDM** 전력공급방식을 검토한 결과 몇 가지 개선사항이 도출되었다. 대표적인 사항은 전력공급장치의 불안정성에서 오는 지나친 설계여유도 적용으로 불필요한 전력이 초과 공급된다는 것이다. 제안된 전력공급장치는 구동 시퀀스 중 중요한 부분을 차지하는 유지전압 공급 측면에서 현저하게 이를 줄일 수 있어 불필요한 전력소모와 이로 인한 코일의 열 발생을 상당히 줄일 수 있음이 드러났다. 또한 유지전압을 기존과 같이 유지할 경우에는 부적절 유지전류에 의한 제어봉의 불시낙하를 상당히 예방할 수 있음이 나타났다. 아울러 구동 시퀀스에 영향을 주는 기계적 운동해제 지연시간을 줄이는 방법으로서 기존과 달리 음전압 인가방법이 제안되었다. 그러나 즉기기의 복잡성이 증대되는 등 몇 가지 아직 개선해야 할 문제가 남아 있는 것으로 나타났다.

Abstract

The design elements of CEDM power supply system were analyzed based on reviews of electro-mechanical phenomena of CEDM. Several improved items were discovered as the results of reviewing conventional CEDM power supply systems. The major items is to supply over-power to CEDM due to applying over-estimated design margin of holding current, because of unstable power

quality of the conventional system. While the suggested method based on pulse width modulating methodology can be reduced the amount of supplied power and dissipated heat of coils when holding power is supplied. In addition, as a method to reduce the drop out delay, the negative voltage applied method was suggested. But there are still remain some shortcomings such as increase of component complexity, etc. regarding the suggested power supply method.

1. 서론

자석책형 제어봉구동장치는 압력경계를 형성하는 압력관의 외부에 감겨진 코일들의 자력을 이용하여 제어봉을 계단식으로 이송하는 방식이다. 이 방식은 고도의 정밀성이 요구되지 않는 원자로에 일반적으로 적용된다. 한국에서 운전 중인 경수로 원전의 경우 모두 자석책형 제어봉 구동장치를 사용하고 있다. 웨스팅하우스 및 프랑스형 경수로의 경우 상부래치는 봉을 옮겨주는 이송용이고 하부래치는 봉을 멈추게 하는 정지용이다. 반면에 한국표준원전의 경우 이송용과 정지용의 구별 없이 제어봉의 이송시 상, 하부래치가 모두 사용되며 정지 시에는 상부래치가 제어봉을 지지한다. 비록 래치의 운동형태는 다소 다르나 근본적으로 래치를 움직이는 힘은 코일에 흐르는 전류에 의해 생성된다는 측면에서 전력공급방식은 모두 동일하다 할 수 있다. 현재 국내에서 운전 중인 모든 자석책형 CEDM의 구동을 위해 사용되는 전력은 SCR을 이용한 위상제어방식에 의해 제공되는 직류전력이다. 기존의 SCR을 이용한 위상제어방식은 입력된 교류전력을 정류기(Rectifier)와 직류변환기(Converter)의 역할을 동시에 수행함으로써 직류전력을 출력한다. 이 때 SCR의 스위칭은 입력된 교류 특성 즉 주파수 및 위상에 따라 SCR의 스위칭을 위한 점화각이 결정된다. 비록 SCR을 이용한 기존의 위상제어방식은 하드웨어의 단순성과 운전 경험 측면에서 돋보이는 장점을 지니지만 기술적으로 고려해야 할 현안은 아직도 존재한다. 대표적인 기술적 현안은 외부 입력전압의 주파수 허용한도 (예, $60 \pm 5\text{Hz}$) 내에서 주파수의 변동이 있는 경우에도 CEDM 전력공급장치의 실제 직류전압출력은 $\pm 20\text{Vdc}$ 까지 변동이 생기는 것으로 보고 되고 있다.[1] 이러한 출력전압 불안정성은 제어시스템 설계시 인가전압의 설정치를 상향조정하게 되고 이에 따라 과도한 전압의 공급으로 전자기 코일의 열을 추가적으로 발생시키는 요인으로도 작용한다. 둘째로 제한된 스위칭 속도로 인한 기술적 제약사항을 들 수 있다. SCR의 스위칭은 입력전압의 주파수의 영점을 탐지하여

수행되기 때문에 SCR 스위칭 속도는 입력전원의 주파수 범위를 초과하지 못한다. 이로 인해 출력전압의 리플이 크게 나타나며, 이는 또한 CEDM 제어시스템의 설계여유도를 제약하는 결과를 가져올 수 있다.

이를 극복하고자 펄스폭 변조방식을 이용한 새로운 전력공급방식이 제안되어 [2],[3] 이를 구현하여 차세대 CEDM 성능실험장치에 설치된 후 약 250만 스텝정도를 성공적으로 운전하였다. 본 논문은 이 같은 운전경험을 바탕으로 새로운 전력공급방식에 대한 기술적 장단점을 논의한다. 특히 CEDM에 대한 전기-기계학적(electro-mechanical) 접근과 이를 통한 설계변수의 의존성, 그리고 전압인가 후 전력을 차단할 때 발산에너지를 어떻게 처리할 것인가에 대해 중점적으로 논의한다.

2. 본 론

2.1 CEDM 구동 메커니즘

자석잭 (magnetic jack)을 이용하여 작동되는 한국표준원전의 CEDM은 래치자석과 리프트자석으로 구성된다. 래치자석은 래치코일로부터 전달되는 전자력에 의해 구동되고 리프트자석은 리프트코일로부터 전달되는 전자력에 의해 구동된다. CEDM 제어시스템으로부터 공급되는 직류전압을 이용하여 전자력이 발생되며 이 전자력은 잭의 토크 또는 제어봉을 끌어올리기 위한 힘으로 사용된다. 제어봉을 이동시키기 위하여 CEDM은 각각의 자석에 맞물림(engagement), 맞물림 유지(holding), 맞물림 해제(disengagement)의 기계적 동작이 순서적으로 수행되도록 전자력을 반복적으로 전달한다. [그림 1]은 하나의 CEDM 모터에 대해 제어시스템으로부터 유도되는 직류전압과 그 직류전압에 따라 변화되는 코일전류의 특성을 단순화된 커브를 통해 보여준다. 그림에서 보여주듯이, CEA 이동은 시간적인 순서에 입각한 제어신호에 의해 이루어지는데 이를 결정하는 주요 요소는 맞물림 시간간격(engagement window) 및 그 전류크기, 유지전류(holding current), 맞물림 해제 지연시간(dropout delay) 및 그 전류크기 등이다.

이 같은 주요 설계요소 분석하기 위해서는 모터 및 코일의 전자기적 특성과 이에 연동되는 CEDM의 기계적 특성을 검토하는 것이 필요하다. 그림 2는 상기의 과정을 전기-기계학적 접근을 위해 하나의 모터를 모델링한 것이다. 이로부터 각각의 운동모드에 대해 운동방정식을 나타내면 다음과 같다. 자세한 계산과정은 참고문헌 [4]에 나타나 있다. 첫 번째로 래치가 봉을 잡고 있다가 전원이 차단될 때의 운동방정식의 결과는 다음 식과 같이 연립 미분방정식으로 표현된다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k(x_p - x) + F_{mech} - \frac{1}{2} \frac{(\mu_0 N^2 A_g i^2)}{(\delta_s + x)^2} \quad (1)$$

$$\frac{di}{dt} = \left\{ \frac{(\mu_0 N^2 A_g \frac{dx}{dt})}{(\delta_s + x)^2} - (R_c + R_d) \right\} \frac{i}{L(x)} \quad (2)$$

여기에서 F_{mech} 은 제어봉 및 연장축 등의 무게이고 k 는 스프링 상수, x_p 는 스프링의 자유상태에서의 크기, N 은 코일의 회전수, 그리고 A_g 는 갭의 면적이다.

전원이 차단된 상태에서 전압을 다시 인가하는 경우 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k(x_p - x) + F_{mech} - \frac{1}{2} \frac{(\mu_0 N^2 A_g i^2)}{(\delta_s + x)^2} \quad (3)$$

$$\frac{di}{dt} = \left\{ \frac{(\mu_0 N^2 A_g \frac{dx}{dt})}{(\delta_s + x)^2} - R_c \right\} \frac{i}{L(x)} + \frac{V(t)}{L(x)} \quad (4)$$

고전압이 인가된 상태에서 봉을 잡고 있는 래치의 상태를 계속 유지하기 위해 저전압이 인가되는 경우는 기계적 운동은 발생하지 않으므로 전술한 기계적운동방정식과 전자기 방정식은 상호 연관되지 않는다. 따라서 각각의 방정식은 다음과 같이 독립적으로 쓸 수 있다.

$$k(x_p - x) + F_{mech} - \frac{1}{2} \frac{(\mu_0 N^2 A_g i^2)}{(\delta_s + x)^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R_c}{L(t)} i - \frac{V_{low}}{R_c} = 0 \quad (6)$$

상기의 각각의 연립미분방정식에 대해 수치해석을 통하여 모의 전류궤적을 얻을 수 있으며 이를 실제 실험결과와 비교한 경우 이론치와 실험치는 유사하게 일치함을 얻는 것으로 밝혀졌다.[5]

2.2 유지전류와 맞물림 해제 전류

CEDM 관련 기술적 관심사항 중 하나인 유지전류의 크기와 최소 맞물림 해제 시의 전류 값은 상기의 모델링을 바탕으로 구할 수 있으며 이를 요약하면 다음과 같다. 유지전류는 고전압 인가에 의해 래치의 맞물림 현상이 발생한 후 이를 유지하기 위한 전류

이다. 실제로 봉을 잡고 있는 래치의 맞물림 해제는 최소 맞물림 해제 전류 값에서 일어나나 이 경우 모터의 인덕턴스가 포화되지 않은 불안정한 상태이므로 모터의 자기적 에너지도 역시 불안정하다. 이로 인해 래치의 맞물림 유지도 불안정한 상태로 남게 된다. 따라서 모터의 인덕턴스가 가장 크게 작용하는, 즉 포화 인덕턴스를 갖게 되는 전류 값이 최소 유지전류로 설정하는 것이 바람직하다. 최소 유지전류를 구하는 과정은 다음과 같다. 모터의 자속밀도 B는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\mu_0 N i_s}{\delta_s} \cong 1.5 \quad (7)$$

이를 풀면 포화전류 즉 최소 유지전류 값은 약 2.2 암페어가 산출된다. (7) 식에서의 자속밀도 값이 1.5 인 이유는 값은 모터 어셈블리의 자화도 분석을 통해 얻은 포화 자속밀도 값에서 유래했기 때문이다. 산출된 최소유지 전류 값은 한국표준원전의 CEDM 제어계통 설계시 가장 중요한 값 중의 하나이다. 이 값을 기준으로 최소 유지 설정치를 산출하게 되고, 이를 바탕으로 래치의 운동을 유지하기 위해 인가되는 전압이 결정되게 된다.

CEDM 제어계통 설계에 있어 또 하나의 중요한 변수는 래치 맞물림 해제 전류 값이다. 이는 전류 값 자체의 의미도 크지만 전원차단 시 모터 및 코일에 존재하는 잔여 에너지로 인한 기계적 운동(맞물림) 해제의 지연시간을 결정하는 주요인자가 되기 때문이다. 전류 값 자체의 의미는 래치의 맞물림을 유지하는 유지전류가 설정치 이하로 떨어져도 최소 맞물림 해제 전류에 도달하기까지는 비록 불안정한 상태이지만 래치의 맞물림 현상은 유지할 수 있다는 것이므로 이 또한 의미를 갖는다. 최소 맞물림 해제 전류 값은 기계력과 자기력이 일치하는 점이다. 자기력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_m = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_i = - \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 A i^2}{(\delta_s + x)^2}, \quad (8)$$

기계력은 이송 모터와 제어봉집합체 및 연장축집합체의 무게에 그리고 스프링 힘을 합한 것이므로 가벼운 제어봉집합체를 기준으로 하면 약 606 뉴톤이 산출된다. 이를 식 (8)에 대입하여 풀면 최소 맞물림 해제 전류 값은 약 0.76 암페어가 산출되는 것으로 나타났다.

2.3 유지전류(Holding Current)에 대한 논의

2.2절에서 검토한 바와 같이 래치의 맞물림 상태를 유지하기 위해서는 최소 유지 전류 값에 부합하도록 CEDM 전력공급장치에서 적정한 전압을 인가해주는 것이 중요하다. 그러나 실제 전력공급장치에서 인가되는 전압은 이상적이지 않기 때문에 실제 전력공

급장치의 특성을 고려하여 그 설정치가 정해져야 한다. 그림 1에서 보여준 바와 같이 이상적인 전력공급장치에서 공급되는 전압은 완전한 직류전압이다. 이 경우 유지전류의 측면에서 살펴보면 계산된 유지전류값은 2.2A 이나 실제 실험결과는 약 2.4 암페어 정도로 나타나는 것으로 나타나므로 최저 유지전류의 기준점을 이 값에 두고 설계의 여유도를 고려해야 한다. 이상적일 경우 설정치의 설계여유도를 20%로 가정할 때 CEDM 제어계통의 알고리즘에서 설정치로 사용되는 값은 약 2.9 암페어 정도일 것이다. 실제로 CEDM 제어계통의 일부인 ACTM에서 사용하는 유지전류설정치는 이 정도 값이다. 그러나 실제 기존의 제어계통에서 인가하는 전압은 약 50-55 Vdc로서 이에 대한 코일의 포화전류를 계산하면 원자로 운전환경에서 약 5.8-6.3 암페어가 산출된다. 이는 설정치보다 전력공급장치의 특성에 따른 설계여유도가 차지하는 비중이 현저함을 보인다. 이러한 논의에서 도출되는 결론은 만일 전력공급장치의 출력전압을 개선한다면 그리퍼 코일에 공급되는 전압을 현저하게 줄일 수 있다는 것이다.

기존 SCR 위상제어방식을 사용한 전력공급장치를 좀 더 자세히 검토해 보면 상기의 과도한 설계여유도의 설정이유가 드러난다. 먼저 주파수 변동에 의한 공급전압의 영향을 살펴보자. SCR을 이용한 위상제어방식을 사용하는 한국 표준원전의 CEDM 제어계통은 SCR 구동 로직으로부터 생성되는 게이트신호에 의해 SCR이 점화되어 전압을 조정하도록 되어 있다. 출력전압준위는 SCR 점화각도에 의해 제어되며 SCR 점화각은 입력 교류전원의 주파수에 의해 영향을 받는다. SCR을 촉발시키기 위한 입력교류의 기준각도는 영점탐지기(zero crossing detector)에 의해 정해진다. [그림 3]은 SCR firing 각도와 관련된 직류출력을 보여준다. CEDM 제어계통에서 사용하는 외부 전력은 60 Hz \pm 5 Hz의 주파수 요건을 따르는 데, 교류주파수 변동으로 인해 영점위상 탐지기가 미세하게 변화된 각도를 보낼지라도 코일에 공급되는 전압출력은 CEDM 제어계통에서 요구하는 출력과 비교하여 넓은 범위로 변화한다. 실제적으로 영광3,4호기에서 교류전원 주파수가 + 5Hz 부터 - 5Hz 까지 변화되었을 때 출력전압은 약 45Vdc의 저준위전압에서 \pm 20V 사이로 변화하는 것으로 밝혀졌다. [참고문헌 2] 이러한 문제점을 해결하기 위해 영점위상탐지회로의 개선 등이 이루어졌으나 근본요인을 제거하는 것은 어렵다고 판명되었다. 이 같은 공급전압의 변화는 맞물림유지전류의 여유도를 감소시키는 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 CEA의 불시낙하를 방지하기 위해 CEDM 제어계통에서는 충분히 큰 전압을 공급할 수밖에 없다. 이 때 20Vdc의 전압손실에 해당하는 전류 손실분은 약 2.4 암페어 정도이다.

다음으로 공급전력의 변동(리플)을 분석해 보기로 한다. 기존의 SCR을 이용한 위상제어방식으로 전압을 코일에 공급할 경우의 공급전압특성 및 전류를 검토하면 다음과 같다. 이 때 외부 입력교류의 주파수 변동은 없는 것으로 가정한다. [그림 3]에서 살펴본 바와 같이 SCR에 의해 정류되는 전압은 점화각에 따라 고전압 및 저전압을 발생한다. 이 때

고전압의 리플특성은 저전압의 경우와 비교하여 매우 좋은 것을 알 수 있다. 반면에 맞물림 유지전류를 흐르게 하기 위한 저전압 형성의 경우 그림에 나타난 바와 같이 리플이 매우 큼을 알 수 있다. 이 전압을 코일에 인가하였을 경우 이론적인 전류의 리플 값을 PSpice 모의모델을 이용하여 구하면 그림 4에 나타난 바와 같이 약 0.4 A 로 나타난다. 이 때 사용한 변수를 살펴보면 SCR의 스위칭 주파수는 180 Hz (60 KHz, 삼상전원), 코일의 인덕턴스는 약 2.5 헨리로 가정한 값이다. 그러나 실제로 저전압 공급시의 전류 궤적을 분석해 보면 이 보다 더욱 심한 리플특성을 가짐을 알 수 있다. 그림 5는 ABB-CE 사가 시험설비 성능시험시 얻은 코일 궤적이다. 실제로 이론적인 값은 0.5 암페어 이내의 리플특성을 갖으나 외부적인 교란 또는 코일특성에 따른 과도현상 때문에 실질적으로는 증가됨을 알 수 있다. 그림 5에 나타난 실제 교류커브에 따르면 저전압에서의 리플의 최대값은 약 1 A이상 이다.

상기의 두 관점에서 나타난 결과를 종합하면 주파수 변동에 의해 발생하는 전류손실분 약 **2.4** 암페어와 SCR의 리플특성에 의해 발생하는 전류손실분은 약 **1A** 이므로 전체적으로 약 **3.4 A** 암페어 정도로 산출되므로 실제 전력공급시스템의 제어모듈 설계시 공급전압 여유도는 이를 포함되어 있는 것으로 판단된다.

이제 펄스폭 변조방식에 의해 구현된 전력공급장치를 논의해 보기로 한다. 펄스폭변조 방식의 전력공급장치에 대해서는 참고문헌 [2, 3]에서 이미 상세하게 설명한 바가 있으므로 본 논문에서는 생략한다. 펄스폭변조방식을 이용한 전력공급장치의 기본 개념은 정류부와 초과부(전압조정부)가 SCR과는 달리 별도로 존재하는 것이다.[그림 6 참조] 초과부는 고속 스위칭이 가능한 전력소자(IGBT)를 사용하여 가칭 주파수 밖의 주파수인 24 KHz의 고속 스위칭이 이루어진다. 이 때 전압조정은 펄스폭의 변조를 통해 이루어지는데 펄스폭변조는 목표전압과 실제전압을 비교하여 실제전압을 목표전압에 근접할 수 있도록 설계되어 있다. 따라서 정류기에서 나온 전압이 변동될 지라도 출력전압은 펄스폭 변조량을 바꾸어 목표전압을 바로 출력할 수 있다는 장점이 있다. 이는 외부 주파수 변동이나 전압변동에 큰 영향이 없다는 것을 의미한다. 출력전압에 따른 코일의 응답 전류 궤적의 리플특성을 살펴보면 PSpice 분석결과 거의 이상적인 전류응답특성이 나타나고, 그림 7과 같이 실제 전류궤적을 살펴볼 때도 리플은 거의 무시할 수준임을 알 수 있다.

결국 펄스폭변조방식으로 설계된 전력공급장치에서는 유지전류에 대한 설정치를 현저하게 낮출 수 있다. 즉 유지전류의 설정치보다 약 20% 정도의 여유도를 가진 전력을 공급하면 기존의 SCR 을 이용한 위상제어방식의 전력공급장치와 유사한 성능을 지니고 있음이 증명된다. 따라서 실제로 래치의 운동 유지시 공급되어야 할 전압은 약 30 VDC 정도면 충분하다는 결론에 다다른다. 실제로 이를 증명하기 위해 맞물림유지전류를 위해 인가하는 전압을 50-55 VDC 대신에 25 VDC로 낮추어 약 2000 스텝 정도 운전한 결과 제어부의 불시낙하는 일어나지 않는 것으로 나타났다. 따라서 기존에 공급한 약 50 VDC 보다 약 20 VDC 정도의 하향 조정이 가능할 것으로 사료되므로 코일에 발생하는 열량과

전력소모량을 현저하게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

2.4 잔여에너지 발산방식에 대한 논의

그림 1에 나타난 R_d 는 기존 위상제어방식의 전력공급장치에서 사용한 발산저항체이다. 발산저항체를 사용하는 목적은 이를 이용하여 코일에 존재하는 잔여에너지를 빠르게 제거하기 위한 것으로서 이를 통해 구동 시이퀀스 설계시 유연성을 지닐 수 있다. 즉 자석채형 제어용 구동장치는 여러개의 모터로 이루어져 있으므로 하나의 구조물이 운동할 때는 연동된 다른 구조물의 운동은 금지된다. 하나의 운동기구가 운동이 완료되고 나서야 비로소 다른 기구는 운동의 시작이 가능한 것이다. 이는 전체 CEDM의 운동속도를 제약하는 결과를 가져오기 때문에 가능한 한 불필요한 시간은 줄여주는 것이 필요하므로 발산저항체의 도입은 필연적이라 할 수 있다. 래치의 맞물림 해제 지연시간은 (2) 식으로부터 쉽게 구할 수 있으며 이를 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$t_d \cong -\tau(I) \ln\left(\frac{I_d}{I_l}\right) \quad (9)$$

여기에서 I_d = 맞물림해제 전류, I_l = 유지전류, τ = 발산저항체에 의한 시정수 (time constant)이다.

이 경우 발산저항체의 저항값에 따라 지연시간이 의존하는데 기존의 경우 수동소자를 사용한다. 즉 설계시 이 값을 고려하여 구현하게 되고 이는 CEDM 제어시스템의 수명 기간동안 일정하게 유지되는 값이다. 반면에 펄스폭변조방식을 적용한 전력공급장치의 경우에는 전력소자를 우회하는 에너지 발산 우회회로를 구성하기에 난점을 가지고 있다. 제로 전압도 펄스폭변조에 의해 생성되므로 전력의 차단을 의미하는 것이 아니므로 발산저항체를 사용하기는 곤란하다. 따라서 잔여에너지의 발산을 위해서 역전압 인가방식을 채택하였다. 마지막 특징은 역전압생성의 능력을 가지는 점이다. 음전압이 인가되었을 때의 회로공식은 다음과 같다.

$$V_N = L(I, x) \frac{dI(t)}{dt} + I(t)R_L, \quad V_N < 0 \quad (10)$$

여기에서 인덕턴스 $L(I, x)$ 는 기계적 변위가 발생하는 기간을 제외하고는 시간에 대해 일정 구간에 대해서는 상수라고 가정할 수 있다. 미분 방정식을 풀면 전류는 다음과 같다.

$$I(t) = I_L e^{-t/\tau(t)} + I_N (1 - e^{-t/\tau(t)}) \quad (11)$$

여기에서 I_N 은 부전압 인가에 따른 부방향 최대전류이다.

기계적 변위가 고정(fixed)되었을 때 마그네트의 포화(saturation) 여부에 상관없이 코일의 인덕턴스는 거의 두가지 상수 값을 가진다. 맞물림해체 지연시간은 식 (7)에 의해 유도된다.

$$t_{dN} = -\tau(I, x) \ln\left(\frac{I_d - I_N}{I_0 - I_N}\right) \quad (12)$$

여기에서 I_d 는 기계적 운동이 해체되기 시작하는 전류 값, I_N 은 부전압 V_N 인가시의 부방향 최대 전류이다. 그러므로 부전압 V_N 의 인가에 따라 기계적 운동(맞물림) 해체지연시간은 조절이 가능하다.

새로운 전력공급장치에 대해 역전압 인가방식을 도입하여 약 200 만 스텝이상의 운전을 수행한 결과 정상속도 중 가장 빠른 속도인 30 IPM에 대해 아무런 무리없이 잘 동작함을 알 수 있었다. 부전압 인가방식의 특징은 프로그램에 의해 부전압량이 조절되는 능동형이라는 것이다. 따라서 운전모드에 따라서 각각 다른 우회회로를 사용하고 있는 기존 방식과는 달리 프로그램에 의해 조정될 수 있으며, 맞물림 해체 지연시간도 손 쉽게 조정될 수 있다는 장점이 있다.

그러나 부전압 인가에 의한 추가적인 전력의 소모와 구동시이퀀스의 복잡성 증대 등은 아직 단점으로 남아있다.

2.5 기타

펄스폭 변조방식을 이용한 CEDM 전력공급장치는 다양한 방법으로 설계될 수 있다. 즉 앞서 설명한 IGBT 네 개를 사용한 풀브릿지 초핑방식에서 2개를 사용한 하프브릿지방식, 아니면 극단적으로는 하나의 IGBT를 사용하는 것도 고려해 볼 만하다. 하프브리지의 경우 음전압 인가가 곤란하므로 발산저항체를 사용하는 것은 꼭 필요하다. 그러나 이 경우 SCR 방식과는 달리 정류소자를 따로 사용하므로 발산열 제거 회로를 구성하는데 애로사항을 지낼 수 있다. 따라서 이 방식에 있어 발산열 제거회로를 구성하는 것이 핵심 기술이라 할 수 있다. 풀브릿지 초핑방식의 경우, 애초에 모든 전압은 IGBT에 의해 제어되므로 우회회로를 사용하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 음전압 인가방식을 이용할 수 있다.

3. 결론

CEDM 전력공급장치의 설계에 있어 CEDM의 전기-기계학적 검토는 반드시 필요하다. 더욱이 새로운 전력공급방법을 설계할 때는 더욱 더 이러한 검토가 요구된다. 기존

의 CEDM 전력공급방식을 검토한 결과 몇 가지 개선사항이 도출되었으며, 이를 바탕으로 새로운 개념의 전력공급장치를 제안하였다. 제안된 전력공급장치는 구동 시퀀스 중 중요한 부분을 차지하는 유지전압 공급 측면에서 현저하게 이를 줄일 수 있어, 불필요한 전력소모와 이로 인한 코일의 열발생을 상당하게 줄일 수 있음이 드러났다. 또한 유지전압을 기존과 같이 유지할 경우에는 부적절 유지전류에 의한 제어봉의 불시낙하를 상당히 예방할 수 있음이 나타났다. 구동시퀀스에 영향을 주는 기계적 운동해제 지연시간을 줄이는 방법으로서 기존과 달리 음 전압 인가방법이 제안되었다. 이는 능동적 방법으로서 운전중에 쉽게 설계변경을 할 수 있는 유연성을 지닌 것이 장점이지만, 구동시퀀스의 증가 및 불필요한 전력소모 등 단점도 또한 지남이 나타났다. 비록 제안된 전력공급시스템이 시험설비상에서 수백만 스텝의 운전경험을 갖고 그 결과가 훌륭하게 진행되었을 지라도 아직도 개선사항은 남아 있다. 즉 기기의 규모를 줄이고 비용을 절감하는 문제는 향후 진행해야 할 연구과제라고 생각한다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. B. M. Kim, "Zero Crossing Detecting Technology in Control Element Drive Mechanism Control System of PWR, KAERI/TR-689/95, 1995.
2. S.Hur, G.S. Jang, Y.S. Suh, S.S. Seong and J.K. Park, "Development of CEDM Control System for CEDM Performance Test", Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting, Pohang, Korea, May 1999.
3. S. Hur, Y.S. Suh, G.S. Gang, S. Choi, D.H. Kim, I.S. Koo and J.K. Park, "Development of an Advanced CEDM Control System for Magnetic Type CEDM", Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface, Washington, DC, Nov. 2000.
4. Y.Y Bae, S. Hur et al. "Development of System Analysis and Evaluation Technologies for KNGR", KAERI/TR-2222/2001, 2002.

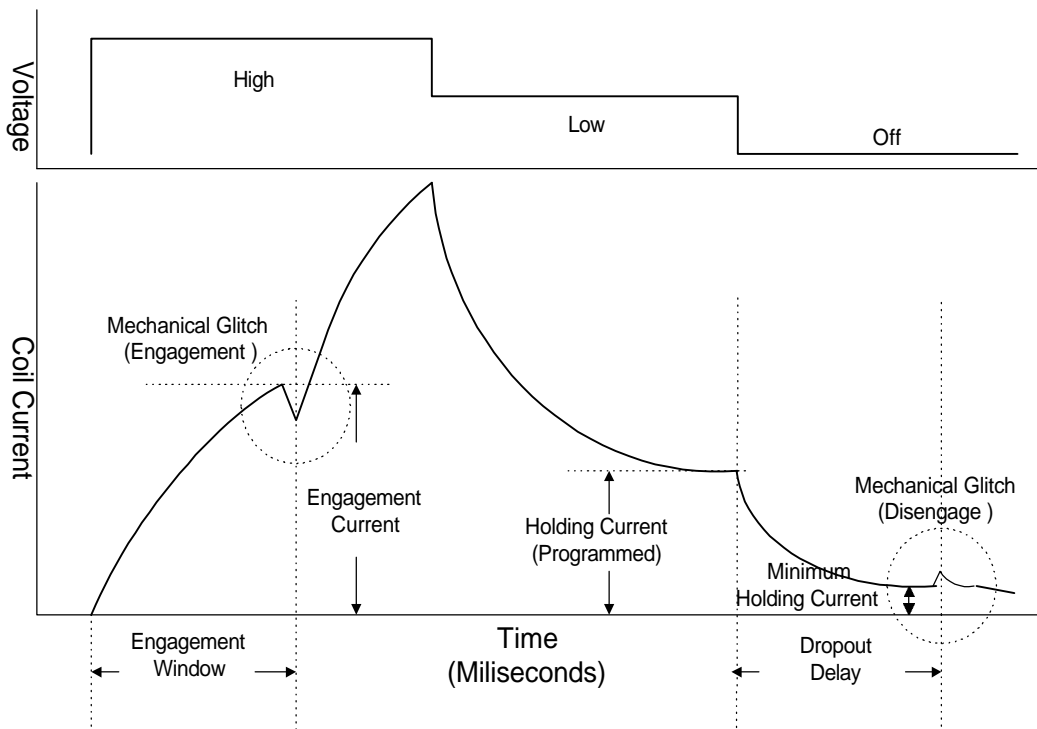


그림 1 이상적인 인가전압에 따른 CEDM 코일의 전류응답특성

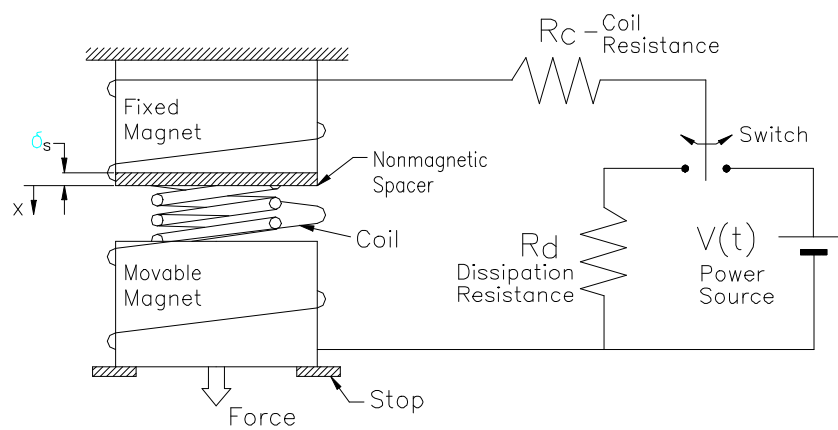


그림 2 CEDM의 단순화 모델과 이에 상응하는 등가회로

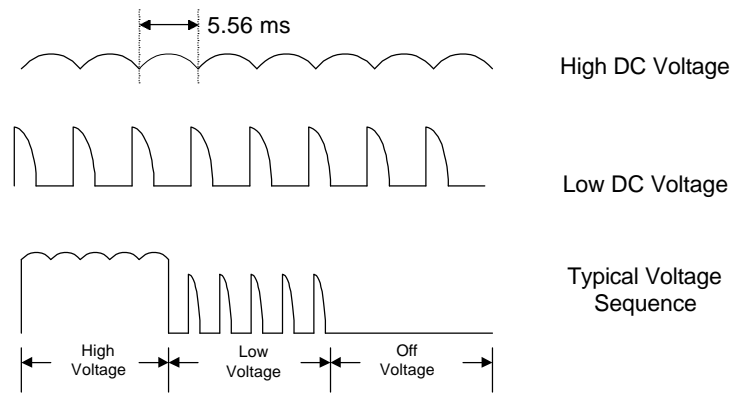


그림 3 위상제어방식에 의한 생성전압 특성

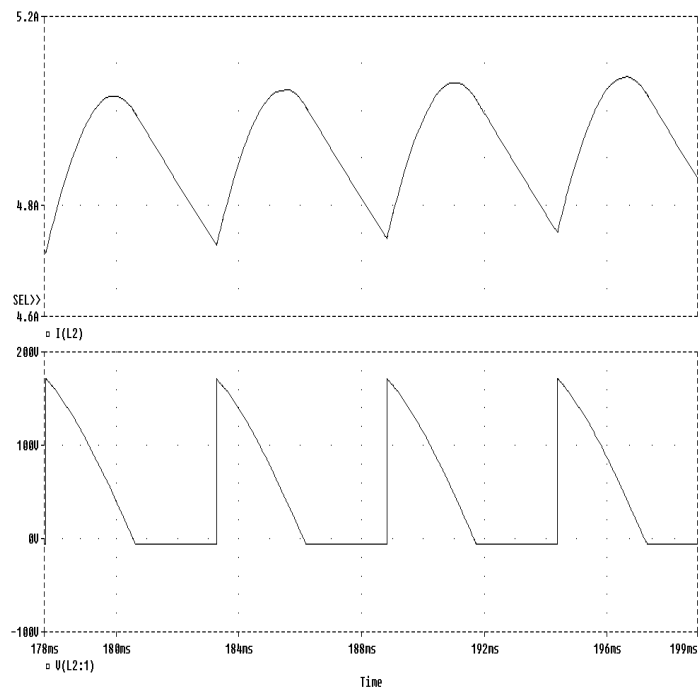


그림 4 위상제어방식에서의 이론적인

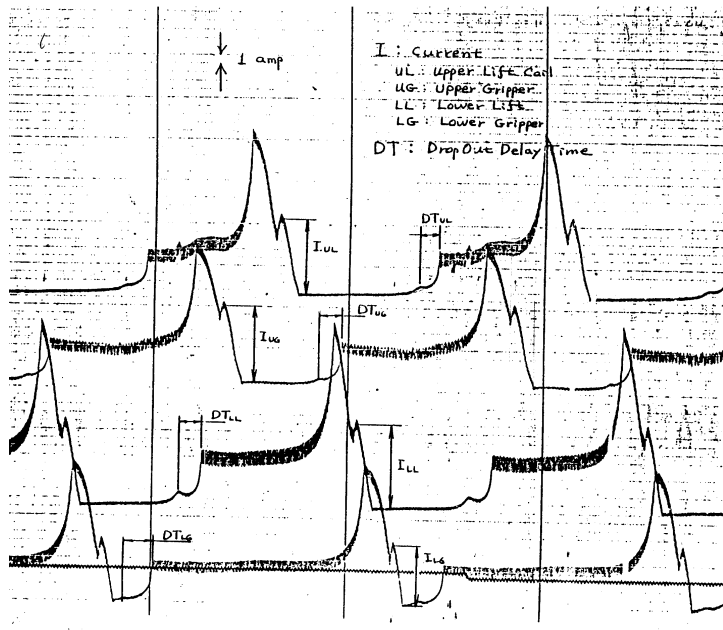


그림 5 위상제어방식을 이용한 전압공급에 따른 실제

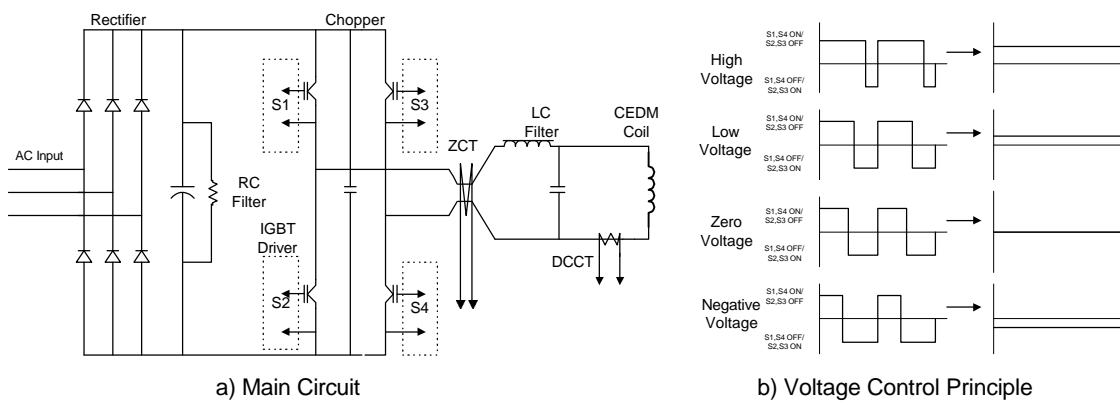


그림 6 PWM 방식의 전력공급장치 주회로도(a) 및 제어 원리(b)

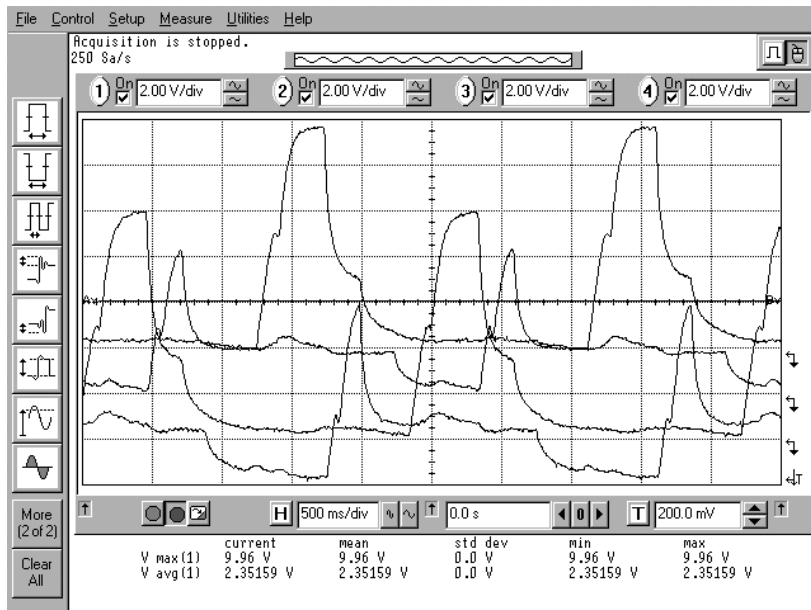


그림 7 전형적인 PWM 전력공급장치의 전류특성