

PLS-II 인젝션 키커의 단일전원장치 설계에 관한연구

순윤규*, 장성덕, 황운하, 이병준, 최재영
포항가속기연구소*

Study on the single power supply design of PLS-II injection kicker

Yoon-Kyoo Son*, Sung-Duck Jang*, Woon Ha Hwang*, Byung-Joon Lee*, Jae-Young Choi*
Pohang Accelerator Laboratory*

Abstract - PLS-II 키커 모듈레이터는 마그넷 코일 4개에 펄스전원을 공급하고 있다. 에너지 저장용 커패시턴스 합성 값은 3.2 μF이고, 두 개의 회로로 커패시턴스 1.6 μF로 나뉘어져 있다. 키커 마그넷 코일 두 개를 직렬연결하고 두 개 회로를 병렬구조로 하여 펄스 폭 6.8 μs, 전류 20 kA, 운전주파수 10 Hz로 운전되고 있다. 커패시터와 코일의 직렬공진에 의해 에너지를 전달하는 직렬공진회로이다. 인덕턴스를 줄일 목적으로 전원장치는 키커 마그넷 가까이 설치되어있다. 이것은 펄스폭에 영향을 미치게 되며 운전전류에 민감해서 그 값이 커지게 되면 입력공급 전압이 높아지게 된다. 장치의 운영적 측면에서 고장이나 키커 모듈레이터 내부에 문제가 발생 하였을 경우 저장링 터널에 설치되어있는 전원을 점검하기 위해서는 빈 운전을 중단하고 접근을 해야 하는 불편함이 있다. 키커 모듈레이터 전원을 단일전원을 하고자 하는 궁극적인 목적은 입사효율을 높이기 위함이며, 입사되는 키커의 변수를 조정하고자 한다. 또한, 정비의 용이성과 입사 시 키커의 전압, 전류를 개별적으로 조절이 가능하게 단일전원으로 장치를 제작하고자 한다. 본 논문에서는 단일전원의 설계와 실험내용을 소개하고자 한다.

$$i(t) = \frac{V_o}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) \tag{식[8]}$$

여기서
C: 키커 커패시터(μF), L: 키커 인덕턴스(μH) R: 선로 및 마그넷저항(Ω)

식[1]에서 식[6]까지는 직렬공진회로의 주기와 공진조건을 찾는 식이며, 식[7]은 키커 회로의 펄스폭을 나타낸 것이고 식[8]은 사인파의 절반에 해당하는 전류를 계산한다. 터널에 설치된 키커 모듈레이터를 실험지역으로 이동하였을 때 케이블 증가에 따라 선로인덕턴스의 증가가 예상된

1. 서 론

키커 모듈레이터는 R-C 직렬공진을 이용하여 부하에 에너지를 전달하는 회로방식에서 펄스폭을 형성하기 위해 사용되는 커패시터와 인덕터의 선정이 중요하다. 저장된 전자빔의 경로에 새로 주입되는 전자빔을 주입하기 위해서는 키커 마그넷 자장의 세기를 제어할 필요가 있다. 저장세기에 의해 전자빔의 궤이 달라지기 때문에 전기회로를 구성 할 때는 이들 소자의 값들이 중요한 인자로 된다. 또한, 정비의 용이성을 위해 터널 내에 설치되어있는 전원을 실험지역으로 이설할 계획을 가지고 있다. 이 경우 부하와 전원장치 간 거리가 증가하게 되고 케이블 인덕턴스가 증가 하게 된다. 따라서 펄스폭도 증가하게 되며 입력전압도 증가하게 된다. 이를 최소로 하는 설계가 중요하다. 현재는 두 개의 마그넷을 직렬로 연결하여 사용하고 있어서 케이블 인덕턴스를 줄이는 것이 중요한 변수로 된다. 단일전원으로 변환을 하게 되면 직렬로 연결된 마그넷 인덕턴스가 줄어들게 되어 전원을 실험지역으로 이설하게 되면 케이블 길이가 증가하여 인덕턴스가 기존에 마그넷 인덕턴스보다 비슷하거나 작은 값을 가지게 된다. 본 논문에서는 현재 단일전원에서 부하를 병렬로 사용하는 시스템에서 각각 4개의 독립회로로 분리하여 설계하고 실험과 전산모사 결과를 비교하고자 한다.

2. 본 론

2.1 키커 모듈레이터 설계

키커 모듈레이터는 에너지 저장용 커패시터와 키커 전자석의 인덕턴스의 직렬공진에 의해 에너지가 전달되는 구조로 설계되어있다. 직렬공진회로에서 사용하는 공식은 다음과 같다.[1]-[3]

$$\omega_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \tag{식[1]}$$

$$\omega_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \tag{식[2]}$$

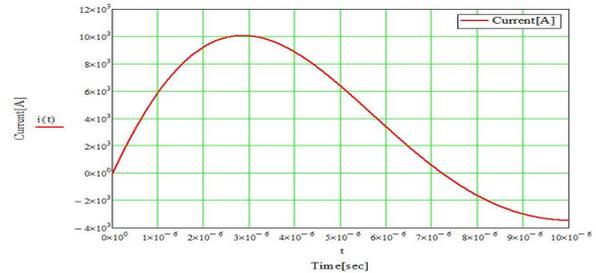
$$\omega_o = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \tag{식[3]}$$

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{식[4]}$$

$$BW = \frac{\omega_o}{Q} = \frac{R}{L} \tag{식[5]}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \tag{식[6]}$$

$$\tau_k = \pi \sqrt{LC} \tag{식[7]}$$



<그림 1> 계산의 의한 키커 전류모양

다. <그림 1>은 식[8]을 사용하여 펄스폭과 전류모양을 나타내었다. 현재는 동축케이블 27.4m(왕복)을 사용하고 있고 독립전원으로 설계 값으로 동축케이블 34m(왕복)을 적용하였다. 동축케이블 길이에 따른 인덕턴스의 증가가 예상되며 펄스폭과 마그넷 전류를 고려하여 에너지 저장 커패시터를 가변 하여 실험을 진행하였다. 마그넷 자장의 변화는 전류의 크기에 비례하기 때문에 전류크기에 중점을 두었다. 현재의 단일전원에서는 마그넷 코일 두 개를 직렬로 연결하는 시스템에서는 인덕턴스가 크게 되어 이를 줄일 목적으로 전원장치를 부하 가까운 곳에 설치해 야만 선로인덕턴스를 줄일 수 있다. 이해 비례 단일독립전원으로 설계 시에는 마그넷 코일 인덕턴스가 하나여서 코일을 두 개 직렬로 연결했을 때 와 달리 마그넷 인덕턴스 값이 줄어들므로 케이블길이를 증가하여도 인덕턴스의 증가는 크게 되지 않는다. 전원장치를 실험지역으로 이동하여 설치하여도 기존에 사용하는 전원시스템에 비해서 큰 차이가 생기지 않는다. 동일한 펄스폭과 전류를 유지하기 위해서는 인덕턴스와 커패시턴스를 조정할 필요가 있다. 현재는 에너지 저장용 커패시턴스 1.6 μF를 사용하고 있다. 단일독립전원은 에너지 저장용 커패시터를 2.4 μF로 증설하여 회로의 임피던스를 낮게 설계할 수 있다. 현재회로와 비교했을 때 임피던스가 줄어들게 되므로 같은 전류를 흘리더라도 상대적으로 입력 측에 공급되는 전압의 크기도 줄어들게 된다. <표 1>은 키커 마그넷 코일의 사양을 보여주고 있다.

<표 1> Kicker Magnet Specification

Parameter	Specification	
Beam Energy	2.0	GeV
Bending Field	0.134	T
Maximum Relative Field Deviation	0.5	%
Maximum Time Jitter from Magnet to magnet	6.0	ns
Number of Turns per Pole	1	Turn
Resistance of magnet@40 °C	8.28	mΩ
Inductance of Magnet	0.867	μH

운전주파수 10 Hz 평균전류는 2 A정도이며 펄스전류는 10 kA이상으로 정격전류보다 크게 사용하고 있다. 싸이라트론에서 주의해야 할 부분은 스위칭 후 역전압의 크기를 10 kV를 넘지 않도록 해야 한다. 짧은 시간(<수 μs)동안 역 전압이 유지되면 전극을 소손시키기 때문에 주의가 필요하다. 직렬공진회로에서 역으로 걸리는 전압은 낮아지도록 입력전압을 낮게 설계하는 것이 유리하다. <표 2>의 데이터는 동축케이블 길이를 34 m로 고정하고 커패시터를 1.6 μF와 2.4 μF로 실험한 결과를 계산결과와 비교를 하였다.

<표 2> 실험측정 데이터

		Measurement Data			
Capacitance[μF]		1.6		2.4	
Voltage[kV]		9		9.99	
Current[kA]		7.6/(8.4)		10.05/(11.2)	
Pulse width[μs]		5.38		6.77	
Total Inductance[μH]		1.83		1.93	
Calculation/Measurement data		Cal'	Meas'	Cal'	Meas'
Kicker magnet[μH]		0.867	0.969	0.867	0.969
Cable Inductance[μH]		0.368	0.231	0.368	0.231
Total Line Inductance[μH]		0.597	0.630	0.698	0.730
Impedance[Ω]		1.18	1.07	0.99	0.89

2.1.1 설계사양 및 회로분석

충전전원으로 직류고전압 인버터 전원을 사용하고 지령충전에 의해 충전이 되도록 설계되어있다. 전기회로 적으로는 커패시터와 마그네틱은 직렬로 연결되고 방전스위치인 싸이라트론 스위치를 닫아 회로가 가지는 시상수로 펄스에너지를 부하로 전달하는 시스템이다. 인버터 용량은 8 kJ/s이고 최대출력전압은 30 kV, 출력전류는 0.53 A이다. 기준회로와 단일독립전원으로 설계 사양을 비교해 보면 <표 3>과 같다.

<표 3> PLS-II 인젝션 키커 모듈레이터 전기적인 사양

Parameter	Specification		
	Double	Single	Unit
Peak Current(total):	20.0	10.0	kA
Pulse-width:	6.8	6.8	μs
FWHM:	4.0	4.0	μs
Flat-top width(± 0.2%):	200	200	ns
Repetition Rate:	10	10	Hz
Peak Charging Voltage:	14	10.0	kV
Total System Inductance:	1.46	1.93	μH
Total Load Inductance:	0.867	0.867	μH
Total Line Inductance:	0.593	1.066	μH
Total System Capacitance:	3.2	2.4	μH
Energy per Pulse:	313.6	120	Joule
Maximum Operable Beam Energy:	3.0	3.0	GeV

단일전원방식의 전원은 기준회로에 비해 인덕턴스 값의 증가가 예상되며 입력 전압이 낮아지도록 설계하였다. Top-up mode 펄스 운전은 3분의 휴지시간과 30초 운전을 반복적으로 하게 된다. 현재 전원은 두 회로 군에 에너지를 공급하는 커패시터 3.2 μF로 되어있고 하나의 군으로 보면 1.6 μF의 커패시터를 가지게 된다. 단일 독립전원에서는 커패시터를 2.4 μF로 설계를 하였다. 마그네틱의 운전전류를 현재의 값과 동일하게 설계하면 커패시턴스의 증설이 필요 하다.

2.1.2 동축케이블 증가에 따른 인덕턴스와 커패시턴스 계산

키커 모듈레이터의 출력전류파형 즉, 마그네틱에 흐르는 전류의 왜곡 현상은 선로에 존재하는 인덕턴스와 부유정전용량에 의해 생성되며 선로 길이가 길어지면 공진왜곡현상이 크게 나타난다. 선로 인덕턴스를 줄일 목적으로 전원장치와 부하 간에 다수의 동축케이블을 사용한다. 동축케이블에 존재하는 인덕턴스 커패시턴스는 길이가 늘어날수록 그 값이 커진다. 메인회로 충. 방전 시 케이블에 존재하는 커패시터도 충전과 방전 현상이 발생되며 공진주기가 짧기 때문에 메인회로에 영향을 주는 것으로 판단된다. 본 장치에서는 동축케이블 RG8U 20가닥을 병렬로 연결을 하였다. 전류파형 왜곡을 보상할 목적으로 보상기 회로 설계를 위해 필요한 케이블의 파라미터의 계산은 필요한 과정이다. 동축케이블의 인덕턴스와 커패시턴스를 계산하기위해 식[9] -식[15]의 공식을 사용하였다. [4]-[5]

$$RC = GL \text{ or } G = \frac{RC}{L} \quad \text{식[9]}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{식[10]}$$

$$\alpha = \sqrt{RG} = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{Z_0} \quad \therefore R = \alpha Z_0 \quad \text{식[11]}$$

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{식[12]}$$

$$L = \frac{Z_0}{v}, \quad G = \frac{\alpha^2}{R} \quad \text{식[13]}$$

$$vZ_0 = \frac{1}{C}, \quad C = \frac{1}{vZ_0} \quad \text{식[14]}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{식[15]}$$

여기서

R은 동축케이블의 저항[Ω], C는 동축케이블의 커패시턴스(F), L은 동축케이블의 인덕턴스(H), Z는 동축케이블의 특성임피던스(Ω), v는 위상속도(rad/sec), β는 위상정수(rad/m), α는 위상정수, λ는 파장

을 나타내고 있다. 위의 공식[1]~[7]을 사용하여 계산된 케이블의 인덕턴스와 커패시턴스 값은 <표 4>와 같다.

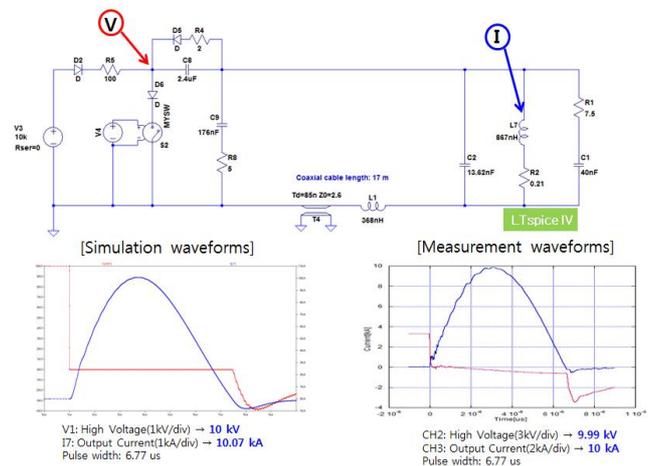
<표 4> 케이 길이에 따른 인덕턴스 및 커패시턴스 값

Data	Section	Length(m)	L(nH)	C(nF)	Td(ns)
2013	5. M1+KP, M4+KP	5.4	58.5	8.65	22.5
	M1+M2, M3+M4	4.6	49.83	7.37	19.71
- 현재	M2+KP, M3+KP	3.7	10.08	5.93	15.42
Single	KPIP+MIP	8.5	92.08	13.62	35.42
Type	KPIN+M1N	8.5	92.08	13.62	35.42

Zo: 2.6 Ω, 20 RG8 coaxial cables in parallel.
Propagation Velocity(% of c): 0.8×c(c: 3×10⁸ m/sec)

2.2 회로실험

단일독립전원의 사양을 확정하고 전산모사와 실험 통해서 설계 값과 실험값을 비교하였다. 연구 2동 키커 모듈레이터에서 커패시턴스 값을 2.4 μF로 회로변수를 수정하고 동축케이블 20가닥과 키커마그네틱 코일을 더미부하로 사용하여 실험을 실시하였다. <그림 3>은 키커 모듈레이터 시험전경을 보여주고 있다. <표 2>에서 보여주는 바와 같이 계산된 동축케이블의 커패시턴스와 인덕턴스 값을 기준으로 전산모사 출력파형을 <그림 2>에 보여주고 있다. 다수의 동축케이블에 존재하는 인덕턴스와 커패시턴스에 의한 출력전류파형 왜곡현상이 효과가 관측이 되었다. 더미부하와 키커 모듈레이터를 연결하는 케이블효과와 방전스위치 양단에 설치되는 스너퍼회로의 변수에 대한 조정시도도 함께 진행하였다. 더미부하인 키커마그네틱과 다수의 동축케이블의 출력전류 파형에서도 전류왜곡현상이 관측이 되었다. 마그네틱 코일양단에 병렬로 R-C 보상기 회로를 설치하였을 경우 출력전류 파형왜곡이 개선되는 효과를 확인하였다.



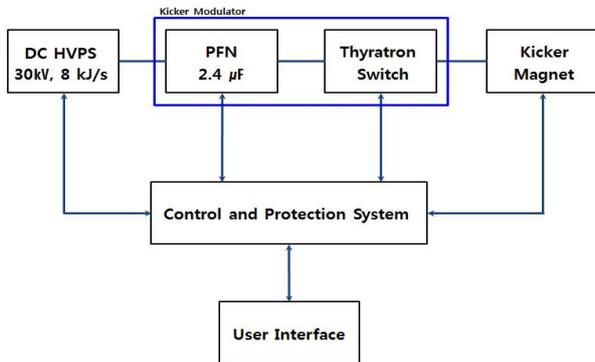
<그림 2> 임피던스 매칭 파형



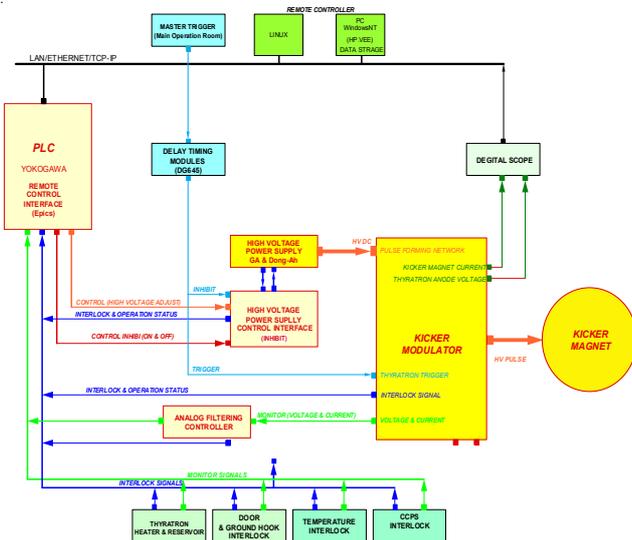
〈그림 3〉 키커 모듈레이터 실험

2.3 제어회로의 구성 및 설계

키커 모듈레이터 제어는 모듈레이터의 안정적인 운전과 인터록의 발생을 감시하고 개인의 안전을 도모하도록 설계하였다. PLC를 사용하여 모듈레이터 로컬제어와 원격제어가 되도록 설계되어있다. 키커 모듈레이터 인터록신호는 스테틱 인터록과 다이내믹 인터록으로 구성되어있다. 다이내믹 인터록은 키커 모듈레이터 출력전류와 충전전압을 감시하고 오 조작으로부터 장치를 보호하도록 되어있다. 장치의 조작과 운전이 필요한 대부분은 스테틱 인터록이 담당을 하고 있다. 메인운전실에서 원격 제어 신호로 인버터 전원의 상승/하강 신호와 짜리아트론 스위치의 턴 온-오프 신호인 트리거 신호를 제어하게 되어있다. 제어기 중앙의 터치스크린은 제어와 인터록 감시를 할 수 있도록 메인화면을 작화 되어있다. 인터록 신호의 최종적인 제어는 고전압 인버터 전원의 온-오프와 트리거 신호의 단속과 출력전압, 전류 등을 관측하게 된다. 출력전압, 전류신호는 아날로그 A/D로 변환하여 통신모듈을 통해 메인운전실제어판에서 관찰 할 수 있게 되어있다. 〈그림 4〉는 키커모듈레이터 제어 블록 다이어그램을 보여주고 있으며, 〈그림5〉은 전반적으로 인터록 신호의 연결을 보여주고 있다.



〈그림 4〉 Kicker Control Layout



〈그림 5〉 키커 제어시스템 개략도

3. 결 론

선형가속기에서 전송된 전자 빔을 저장링에 주입하기 위해서는 키커 시스템이 중요한 역할을 담당하고 있다. 회로 적으로는 마그넷 두 개 직렬연결 다시 병렬구조로 연결하여 하나의 전원에서 동시에 회로를 구동하는 방식으로 되어있다. 키커마그넷 각각의 시간지연과 코일의 자장변화를 조절할 수 있으면 입사효율을 향상시킬 수 있다. 키커 마그넷에 개별적으로 에너지를 공급할 목적으로 단일전원으로 설계하고 실험을 통해 에너지 저장용 커패시터의 증설과 케이블 길이 증가에 따른 펄스폭과 전류의 크기를 확인하였다. 커패시터의 용량을 증설하고 모듈레이터를 실험지역으로 이설하여 설치할 경우 인덕턴스 증가를 고려한 회로변수 설정과 설계를 완료하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정성훈 외, "Kicker Modulator Technical Report", PAL-Pub, 2000
- [2] S. H. Nam, S. H. Jeong, and J. H. Suh, "STUDY ON THE PLS INJECTION KICKER MAGNET AND MODULATOR", Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001
- [3] S. H. Nam, S. H. Jeong, and I. S. Ko, "OPERATING CHARACTERISTICS OF THE PLS INJECTION KICKER MODULATOR", Proceedings of the Twenty-Third International Power Modulator Symposium, California, USA, 1998
- [4] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics", Third edition, pp151-155, pp803-813, 2004
- [5] 손운규 외, "PLS-II 인젝션 키커 모듈레이터 파형개선을 위한 보상 회로 설계", Proc. of the KIEE Summer Annual Conference 2014, Vol. C, pp1259-1260, YongPyung Resort, PyeongChang, Korea, July 16-18, 2014