

SSPA용 전원공급기의 돌입전류 보호회로 분석 및 설계

Analysis and Design of the In-Rush Current Protection Circuit for SSPA Power Supply

박 상 현* **박 동 철**** **김 대 관*****
Park, Sang-Hyun Park, Dong-Chul Kim, Dae-Kwan

ABSTRACT

Recently developed radars use the solid-state power amplifier to amplify the RF signal. The stability of RF signal directly depends on that of the electric power. So the stable and reliable electric power should be needed. When the electric power switch is tuned on for the first time in order to operate the radar system, the in-rush current is generated because of the capacitive characteristic. The excess in-rush current breaks the element. Therefore, the analysis about the in-rush current to design the electric power system is necessary. In this paper, modeling and simulation on the whole power system is carried out and the necessity of limiting the in-rush current is verified. After the analysis, the circuit to limit the in-rush current is designed and examined to verify the analysis. The circuit is good enough to limit the in-rush current.

주요기술용어(주제어) : SSPA(Solid-State Power Amplifier), RADAR, In-Rush Current, Modeling and Simulation, Electric Power

1. 머리말

레이더는 전파를 방사한 후 표적으로부터 반사된 신호를 이용하여 표적에 대한 정보를 획득하는 장치이다. 멀리 떨어진 표적을 탐지하기 위해서는 방사되는 전파의 세기가 커야 된다. 레이더에서 초기에 생

성된 신호는 크기가 작으며, 작은 신호를 원하는 크기의 큰 신호로 증폭하여야 한다.

레이더의 신호 증폭 방법에는 여러 가지가 있으나 능동형 레이더에서는 반도체를 이용한 방법이 최신의 기술이다^[1]. 반도체를 이용하여 신호를 증폭하기 위하여 필요한 에너지는 전원공급기를 이용하여 제공한다.

이때 증폭된 레이더 신호의 안정성에 직접적인 영향을 주는 것이 전원공급기이다. 따라서 신호증폭을 위한 전원공급의 안정성 및 신뢰성이 레이더의 성능에 직접적인 영향을 준다.

레이더는 운용환경에 상관없이 신뢰성 있는 운용이

† 2008년 8월 18일 접수~2008년 9월 19일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

*** LIG 넥스원(LIG NEX1 Co.)

주저자 이메일 : pshwave@yahoo.co.kr

교신저자 이메일 : dcpark@cnu.ac.kr

보장되어야 하며, 특히 레이더의 신호를 증폭하는 소자의 신뢰성이 필요하다. 증폭소자가 운용될 때 최초로 수행되는 동작은 전원을 켜는 것이다. 커패시터 인풋형 정류방식을 사용하는 경우에 초기 전원인가 시에는 커패시터의 충전 전하가 없는 상태이므로 전기적으로 단락상태와 같다. 따라서 순간적으로 큰 전류가 흐르게 되며, 이를 돌입전류라 한다. 과도한 돌입전류는 정류 다이오드의 파손이나 스위치 접점 소손 등의 현상이 발생할 수도 있으므로 보호가 필요하다^[2,3].

전류를 충전 및 공급하는 장치를 보유하여 이 장치에 미리 충전하고 있다가 과도한 돌입전류가 흐를 때 전류를 공급하여 주는 방법을 이용하는 경우도 있으나^[4], 본 논문에서는 전류를 제한하여 과도하게 흐르지 않도록 하는 방법을 사용하였다. 전원 시스템 전체에 대한 모델링을 바탕으로 하여 수행한 시뮬레이션 결과와 시험 회로구현 및 시험결과에 대하여 기술한다.

2. 돌입전류 제한회로 분석

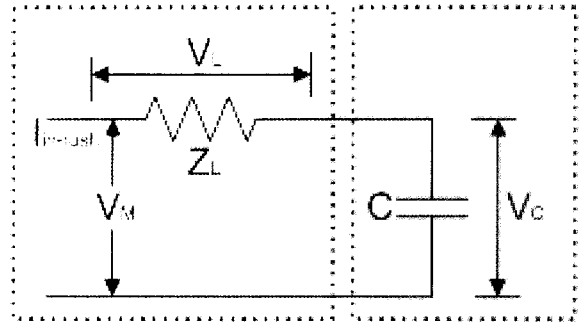
돌입전류 제한회로는 순간적으로 흐르는 전류의 최고 값을 제한하는 것이 목적이다. 전류의 순간적인 최대 값은 라인임피던스에 의하여 결정된다. 즉 입력부의 라인임피던스가 Z_L 이고, 입력전압의 최대 값이 V_M 이면 돌입전류의 최대 값은 다음과 같다^[3].

$$I_{in-rush} = V_M / Z_L \quad (1)$$

출력 쪽에 있는 커패시터가 충전되면 커패시터의 전압 V_C 가 점차 커지기 시작하며 흐르는 전류는 다음의 식과 같이 된다.

$$I = (V_M - V_C) / Z_L \quad (2)$$

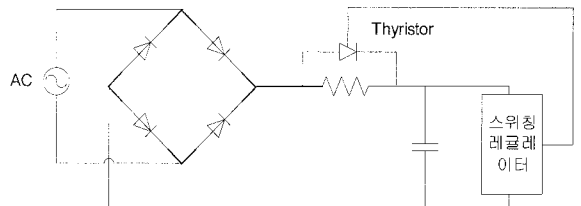
식 (2)와 같이 커패시터가 충전됨에 따라 회로에 흐르는 전류는 점차 감소하게 되며, 완전 충전이 이루어지면 흐르는 전류는 없다.



[그림 1] 부하의 변화에 따른 전류변화

돌입전류는 초기 전원인가 시 부하 쪽의 커패시터 충전이 없는 상태에서 흐르는 전류를 말하며, 그 크기는 라인임피던스의 조절을 통하여 제한할 수 있다. 그러나 전류의 크기를 지나치게 제한하면 부하 쪽 콘덴서에 대한 충전 시간이 증가하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

돌입전류를 제한하기 위한 회로는 여러 가지 방안이 있을 수 있으나 그림 2와 같은 저항과 thyristor를 병렬로 사용하는 방법^[3]을 이용하여 구현하기로 하였다.



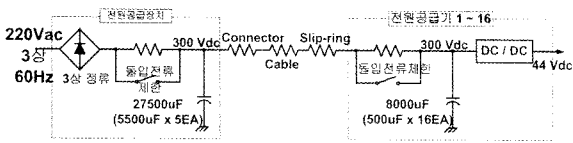
[그림 2] Thyristor를 이용한 돌입전류 제한회로

Thyristor는 게이트와 캐소드 단자 사이에 (+)의 전압을 인가하면 도통되는 소자이며, 도통 상태에서는 다이오드와 같이 약간의 순방향 전압강하를 갖는다. Thyristor는 한번 도통되면 입력 전원 자체를 끄기 전까지는 도통 상태를 유지하는 특성을 가지고 있다. 최초 전원 인가 시 thyristor는 차단상태이므로 커패시터를 충전하는 돌입전류는 저항을 통해 그 크기가 제한되어 흐르게 되고, 일정 시간이 경과한 다음 thyristor의 게이트에 신호를 인가하면 thyristor가 도통되어 대부분의 전류가 thyristor를 통해 흐르

게 된다. thyristor를 저항과 병렬로 사용하는 이유는 저항을 통한 지속적인 손실을 방지하기 위함이다. 이와 같이 저항과 thyristor를 병렬로 사용하는 방법에는 thyristor의 도통 시 라인임피던스의 급격한 변화로 2차 돌입전류가 발생하게 되는데, 전원 인가 후 thyristor의 도통 시점까지의 시간이 짧을수록 2차 돌입전류가 커지게 되며 최악의 경우 2차 돌입전류의 크기가 더 커지는 상황이 발생할 수도 있다. 따라서 평활 커패시터의 충전 시상수에 맞추어 충분한 시간 후에 도통이 되도록 제어시점을 조절하여야 한다.

3. 전원공급 시스템 모델링

전원공급기는 SSPA에 필요한 안정적인 전원을 공급하며, 전원공급기까지 공급되는 300Vdc의 공급 계통은 그림 3과 같다. 합정 내부의 발전기에서 생성되는 교류전류(220Vac/3상)가 합내에 위치한 전원공급장치에 공급된다. 전원공급장치는 220Vac/3상의 교류전원을 전파정류하여 300Vdc를 만든다. 300Vdc 전원은 커넥터 및 케이블, Slip-ring을 거쳐서 전원공급기로 공급된다. 전원공급기는 300Vdc전원을 이용하여 SSPA에서 필요한 전원을 만들어 공급하여 준다.



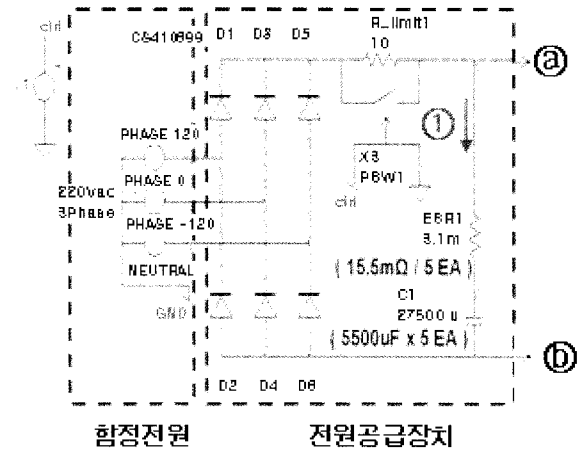
[그림 3] 전원 공급도

각 구성품별 규격은 다음과 같다.

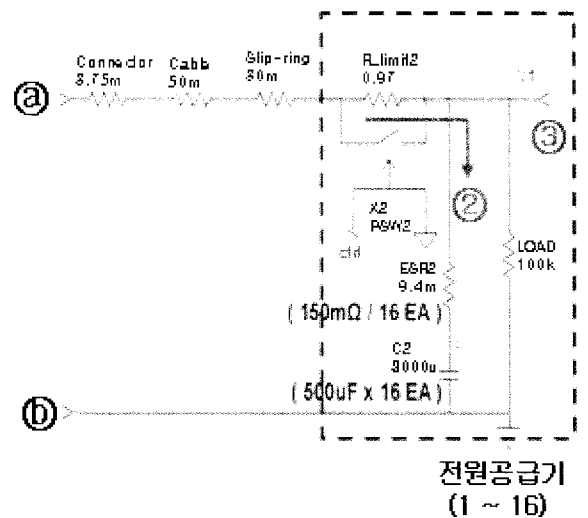
전원공급장치는 입력전원으로 3상의 220V 교류전원을 이용하여 직류전원 300Vdc/100A출력을 제공한다. Slip-ring은 4개의 채널을 보유하며, 채널별로 내부저항이 $30 + 2/-0m\Omega$ 이고 허용전류는 최대 50A이다. 전원공급기 1~16은 각각 입력전원이 직류전원 300V/7.5A이고 출력전원은 44Vdc/10A이다.

위와 같은 전원공급 계통을 시뮬레이션하기 위한 모델링 결과는 그림 4 및 그림 5와 같다. 편의상 thyristor를 스위치로 묘사하였다^[5]. 그림 4에서는 합

정전원 및 전원공급장치의 모델링을 보여주고, 그림 5에서는 전원공급계통의 커넥터 및 Slip-ring과 전원공급기의 모델링을 보여준다.



[그림 4] 합정전원 및 전원공급장치 시뮬레이션 회로도



[그림 5] 전원공급기 및 기타 시뮬레이션 회로도

모델링에 사용된 각각의 파라미터 값은 표 1과 같다. 전원공급기는 전원공급기 입력 커패시터의 충전이 완료된 후에 부하로 전원을 출력하므로 출력부하는 무시한다. 따라서 그림 5의 모델링 회로에 표시된 LOAD는 전원공급기의 출력부하를 표시하는 것이 아니라 돌입전류에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위한

값으로 흐르는 전류가 ②번 경로에 비하여 상대적으로 무시할 수 있는 정도로 설정한다.

[표 1] 시뮬레이션 파라미터

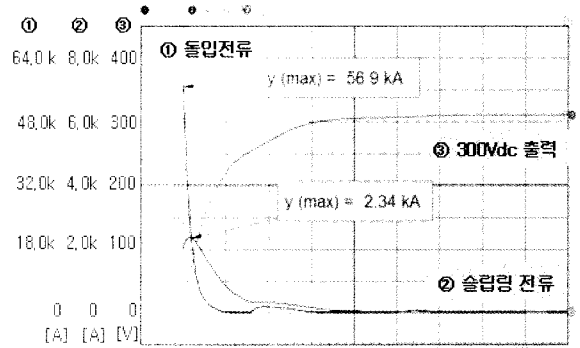
파라미터	설정 값
정류다이오드(D1-D6)	600V/100A 급
전원공급장치 돌입 전류제한(R_limit 1)	10Ω
전원공급장치 커패시터(C1)	C1 : 27,500μF ESR 1 : 3.1mΩ
커패터 등가저항	3.75mΩ (커패터당 75mV drop 기준, 5개 커패터 사용)
케이블 등가저항	50mΩ
슬립링 등가저항	30mΩ
전원공급기 돌입전류 제한(R_limit 2)	0.97Ω (15.5mΩ/16EA)
전원공급기 입력 커패시터(C2)	C2 : 8,000μF (500μF*16EA) ESR2 : 9.4mΩ (150.4mΩ/16EA)
부하(Load)	100kΩ

4. 시뮬레이션 및 분석

위의 모델링 결과를 이용하여 다음의 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

- ① 전원공급장치와 전원공급기 1~16에 돌입전류 제한하지 않았을 경우
- ② 전원공급장치만 돌입전류 제한
- ③ 전원공급기 1~16만 돌입전류 제한
- ④ 전원공급장치와 전원공급기 1~16에 돌입전류 제한

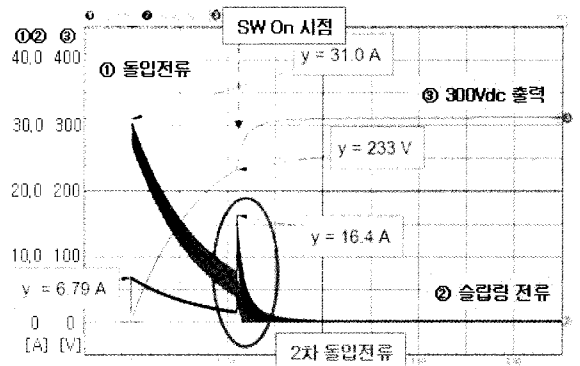
첫 번째의 경우, 즉 돌입전류를 제한하지 않았을 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다.



[그림 6] 돌입전류를 제한하지 않은 경우

시뮬레이션 결과 전원공급장치에 흐르는 돌입전류는 56.9kA_{peak}이고, Slip-ring을 통하여 전원공급기 1~16에 흐르는 돌입전류는 2.34kA_{peak}로 개별 전원공급기에 흐르는 돌입전류는 146.3A_{peak}(=2.34kA/16)이다.

두 번째의 경우, 즉 돌입전류의 제한을 전원공급장치만 하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다.



[그림 7] 전원공급장치만 돌입전류 제한

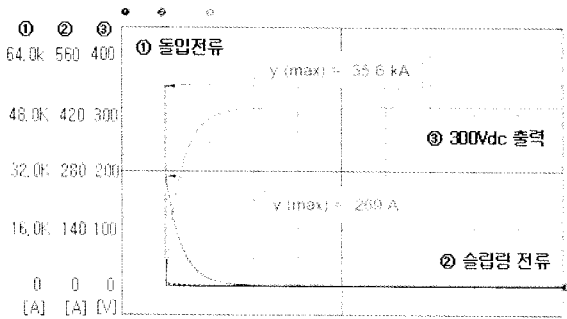
전원공급장치에 돌입전류의 제한을 위하여 10Ω (=310[V]/31[A])의 저항을 직렬로 삽입하였다.

시뮬레이션 결과 전원공급장치에 흐르는 전류는 31 A_{peak}이고 슬립링을 통하여 전원공급기 1~16으로 흐르는 돌입전류는 6.79A_{peak}로 개별 전원공급기에 흐르는 돌입전류는 0.4A_{peak}(=6.79A/16)이다. 이 경우에는 전원공급장치의 돌입전류 제한회로에 있는 스위치의 동작으로 인한 16.4A의 2차 돌입전류가 발생하여, 개

별전원공급기에 약 $1A(=16.4/16)$ 의 돌입전류가 흐르게 된다.

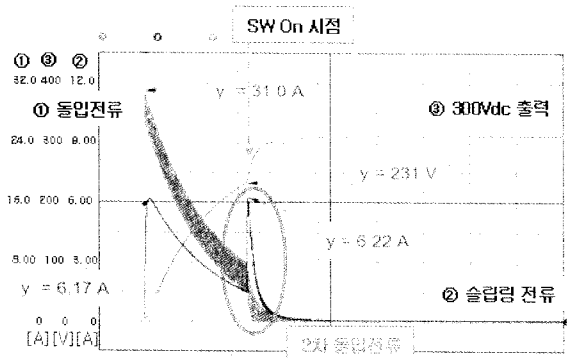
세 번째의 경우, 즉 돌입전류의 제한을 전원공급기 1~16만 하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다. 전원공급기 1~16의 돌입전류 제한을 $320A_{peak}$ 로 제한할 경우 전류제한 저항 값은 $0.97\Omega(=300[V]/320[A])$ 이다.

시뮬레이션 결과 전원공급장치에 흐르는 전류는 $55.6kA_{peak}$ 이고 Slip-ring을 통하여 전원공급기로 흐르는 돌입전류는 $269A_{peak}$ 로 개별 전원공급기에 흐르는 돌입전류는 $16.8A_{peak}(=269/16)$ 이다.



[그림 8] 전원공급기 1~16만 돌입전류 제한

마지막으로 돌입전류의 제한을 전원공급장치와 전원공급기 1~16에 하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다. 돌입전류의 제한을 위한 직렬저항 값은 전원공급장치가 10Ω , 전원공급기가 0.97Ω 이다.

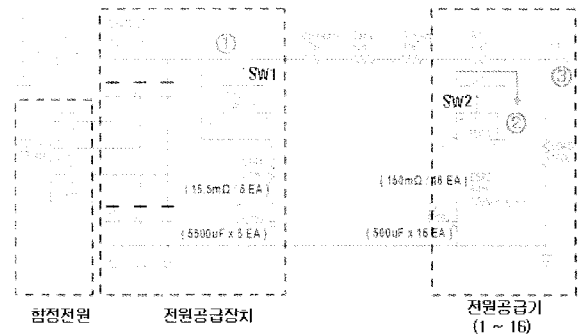


[그림 9] 전원공급장치와 전원공급기에 돌입전류 제한

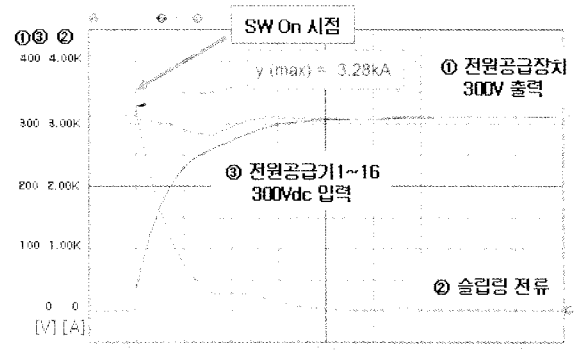
시뮬레이션 결과 전원공급장치에 흐르는 전류는 $31A_{peak}$ 이고 슬립링을 통하여 전원공급기 1~16으로 흐르는 돌입전류는 $6.17A_{peak}$ 로 개별 전원공급기에 흐르는 돌입전류는 $0.38A_{peak}(=6.17A/16)$ 이다. 이 경우에는 돌입전류 제한 회로에 있는 스위치의 동작으로 인한 $6.22A$ 의 2차 돌입전류가 발생한다. 시뮬레이션의 결과에 따르면 전원공급장치에만 돌입전류를 제한하면 전원공급장치의 정상동작 전류 및 슬립링의 채널 허용전류 이내로 전류가 흐른다.

그림 10의 시뮬레이션은 전원공급장치가 안정화 된 후 전원공급기 1~16에 전원을 인가한 경우에 대한 시뮬레이션을 위한 회로 및 결과이다. 전원공급기 1~16에 돌입전류 제한을 하지 않은 경우와 한 경우에 대한 결과이다.

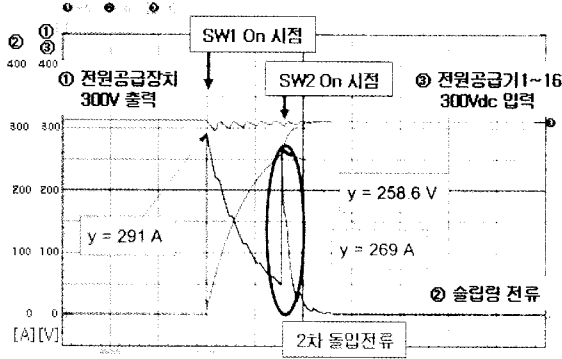
돌입전류 제한을 하지 않았을 경우에는 SW1을 붙이는 시점에 전원공급기 1~16으로 $3.28kA_{peak}$ 의 돌입전류가 발생하며, 개별 전원공급기에 흐르는 돌입전류



[그림 10] 전원공급기 1~16만 별도 전원인가



[그림 11] 별도 전원인가 시 돌입전류 제한 미사용



[그림 12] 별도 전원인가 시 돌입전류 제한 사용

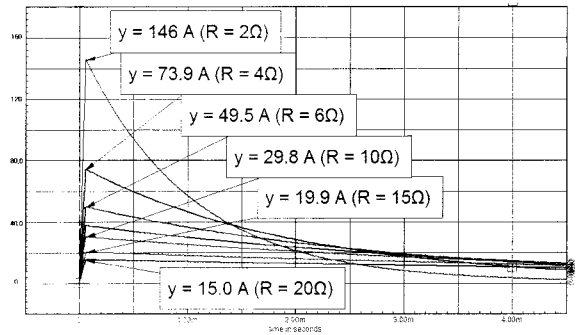
는 $205A_{peak}(=3280/16)$ 이다. 그러나 전원공급기에 제한을 하도록 회로를 첨가하였을 경우에는 돌입전류가 $18.2A_{peak}(=291/16)$ 로 낮아지나, SW2에 의한 2차 돌입전류 $16.8A_{peak}(=269/16)$ 가 발생한다.

5. 회로 설계 및 시험

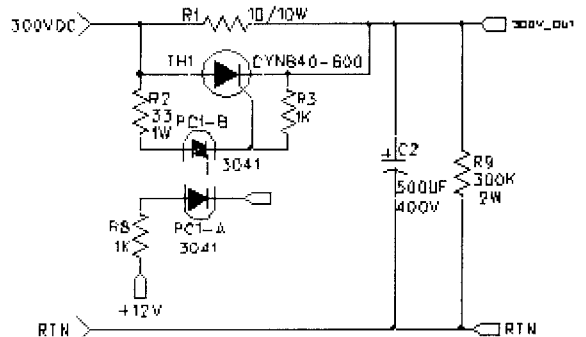
돌입전류는 초기 전원 인가 시 내부 커패시터 충전을 위하여 흐르는 과도 전류로 가능한 낮아야 한다. 전원공급장치와 전원공급기가 연결된 상태에서는 전원공급장치에만 돌입전류제한을 수행하면 되나, 전원공급기의 별도 운용상황을 고려한 시뮬레이션 결과 전원공급기에도 돌입전류를 제한하여야 함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션에서 전원공급기의 정상전류를 4A로 고려하여 돌입전류 제한 값을 20A(정상전류의 5배)로 하였다. 그러나 전원공급기에 흐르는 돌입전류의 제한 값 설정을 위하여 값 설정 시 설계 여유도를 갖기 위하여 최대값 7.5A의 5배인 37.5A를 설계 기준 값으로 삼았다.

돌입전류 제한을 37.5A로 하기 위한 직렬 저항 값은 여유를 고려하여 $10\Omega(8[\Omega]=300[V]/37.5[A])$ 로 설정하였다. 이 저항 값에 의한 돌입전류 제한 값은 이론적으로 30A이다. 돌입전류 제한을 위한 직렬 저항 값에 따른 돌입전류 크기의 변화에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 13과 같다.

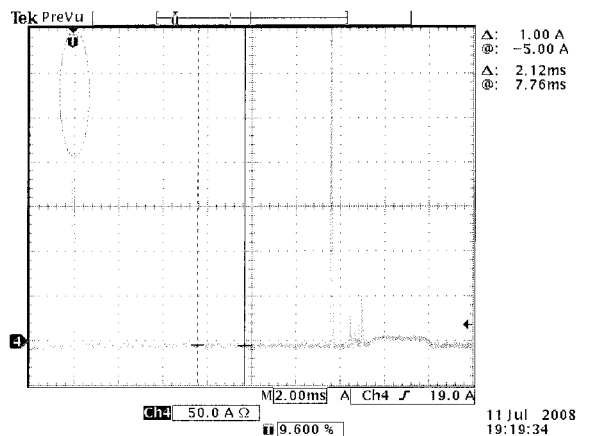
돌입전류 제한회로는 저항과 thyristor를 병렬로 사용하는 방법을 이용하여 그림 14와 같이 설계하였다.



[그림 13] 돌입전류 저항 값에 따른 전류크기



[그림 14] 전원공급기 돌입전류 제한회로

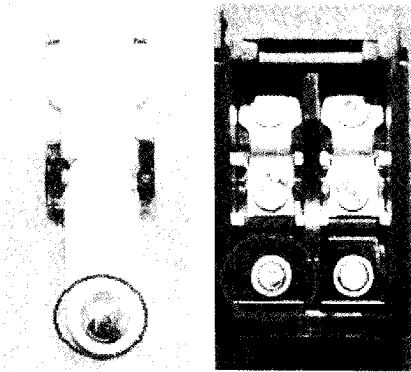


[그림 15] 제한회로 적용전의 돌입전류

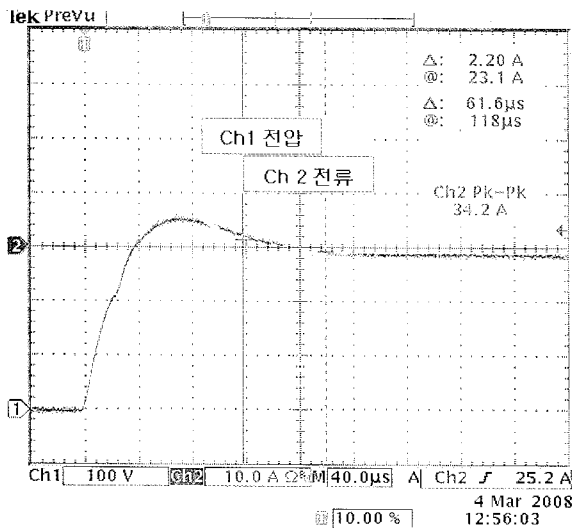
초기 300Vdc 전원 인가시 저항 R1을 통하여 최대 값이 제한된 전류가 커패시터 C2를 충전시킨다. C2가 충분히 충전된 후 thyristor(TH1)가 도통되면 저항 R1을 통하여 흐르던 전류의 대부분이 TH1을 통

하여 흐르게 되어 R1에 의한 손실을 방지하게 된다. Thyristor는 한번 도통이 되면 인가된 전원이 제거되지 않으면 도통상태를 유지한다.

제한회로의 적용전과 위의 돌입제한 회로를 반영/제작한 후의 돌입전류를 측정하였다. 그림 15와 같이 돌입전류제한회로 미적용시의 측정치는 350A_{Peak} 이상으로 그림 16과 같은 전원 스위치 접점의 소손현상이 발생하였다. 제한회로 적용시 측정된 돌입전류는 그림 17과 같이 34.2A_{Peak}로 규격 이내로 만족함을 확인하였다.



[그림 16] 과도한 돌입전류로 인한 스위치 접점 소손



[그림 17] 제한회로 적용 후 돌입전류

6. 맺음말

최신의 능동형 레이더에는 RF 증폭소자로 반도체 신호 증폭소자를 사용한다. RF의 신호특성에 직접적인 영향을 주는 것이 전원이며, 안정적이고 신뢰성 있는 전원공급이 필요하다.

레이더의 운용에 따른 전원공급 절차에서 초기 전원인가 시에 커패시터로 인한 돌입전류가 발생한다. 과도한 돌입전류는 소자의 파손 혹은 고장으로 연결되기 때문에 분석이 필요하며, 필요 시 설계에 반영하여야 한다. 전체적인 전원 공급계통에 대한 분석과 레이더 운용을 감안하여 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과에 따라 전원공급기에 돌입전류 제한회로의 필요성을 확인하였다. 회로의 설계에는 저항과 thyristor를 병렬로 사용하는 방법을 이용하여 돌입전류의 최대값은 정상전류 7.5A의 5배인 37.5A로 제한하도록 저항 값을 10Ω로 설정하였다. 제작결과 34.2A_{Peak}로 규격 이내로 만족함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Mark E. Russell, "Future of RF Technology and Radars", 2007 IEEE Radar Conference, pp. 11~16, 2007. 10.
- [2] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronics - Converters, Applications and Design", John Wiley & Sons, Inc., pp. 112, 1995.
- [3] 전자기술연구회, "전원회로 설계 마스터", 기문사, pp. 33, 43~47, 2005.
- [4] 김태훈 외, "돌입전류와 전자기간섭을 고려한 항공기용 전원공급장치 개발", 해상무기체계 발전세미나, pp. 432~441, 2004.
- [5] Charles E. Hymowitz, "Power Specialist's Application Note Book", Intusoft, pp. 72~136, 1998.