

인공위성 전력 시스템 보호를 위한 퓨즈 선정 기법 연구

전현진*, 임성빈**, 이상록***

A Study on the Fuse Sizing Technique for the Protection of Satellite Power System

Hyeon-Jin Jeon*, Seong-Bin Lim**, and Sangrok Lee***

Abstract

Power system in satellite is protected by installing fuses, LCLs (Latching Current Limiters), etc. between satellite power supply and loads. In this paper, the fuse sizing technique for satellite power system protection is addressed. Detailed fuse sizing method is explained and it is shown that the single fuse connection method is mathematically subordinated to the parallel fuse connection method. In addition, appropriate fuse selection method is newly suggested under a situation where exact current characteristics of a load connected to a fuse is unknown.

초 록

인공위성의 전력 시스템을 보호하기 위해서 퓨즈나 LCL (Latching Current Limiter) 등을 부하와 전원 공급 장치 사이에 연결한다. 본 논문에서는 인공위성에서 장착되는 퓨즈의 용량 선정 기법에 대해 논하였다. 퓨즈 용량 선정 방법에 대해 기술하였고, 병렬 (Parallel) 퓨즈 연결 방식을 수학적으로도 단일 (Single) 퓨즈 연결 방식으로 나타낼 수 있음을 보였다. 또한, 퓨즈에 연결되는 부하의 정확한 전류 특성이 알려지지 않은 상태에서 적절한 퓨즈 선정 기법을 새롭게 제시하였다.

키워드 : 퓨즈 (fuse), 위성 전력 시스템 (satellite power system), 퓨즈 용량 선정 (fuse sizing), 전류 특성 (current characteristics)

1. 서 론

위성에 쓰이는 퓨즈는 위성의 전력 시스템과 유닛 사이에 연결되어 유닛에 fault가 발생했을 때 위성 전력 시스템을 보호하기 위한 전자부품

이다. 즉, 퓨즈에 연결된 유닛에 퓨즈의 정격 용량보다 큰 전류가 흘렀을 경우에 퓨즈가 blow-out되면서 위성 전력 시스템을 보호하게 된다 [1-2].

퓨즈가 blow-out 되는 경우는 퓨즈에 흐르는

접수일(2012년 5월 4일), 수정일(1차 : 2012년 6월 13일, 게재 확정일 : 2012년 7월 1일)

* 다목적실용위성3A호체계팀/hjjeon@kari.re.kr

** 다목적실용위성3A호체계팀/sblim@kari.re.kr

*** 다목적실용위성3A호체계팀/sangrok@kari.re.kr

전류가 AC (Alternating Current) 형태를 포함하는 transient 형태일 때와 DC (Direct Current) 형태일 때로 구분할 수 있다. Transient 형태의 전류를 가질 때는 퓨즈에 연결되는 유닛의 steady-state 전류가 AC 형태를 나타내거나 유닛에 최초 전원이 들어갔을 때 돌입전류(Inrush current)가 발생할 때 등이다. DC 형태의 전류를 가질 때는 유닛의 steady-state 요구전류가 DC 형태를 가질 때이다. 만약, 유닛의 steady-state 전류가 주기가 짧은 펄스형태를 나타낸다면 전류의 RMS (Root Mean Square) 값을 이용해 DC 전류로 해석하는 것이 적절하다.

퓨즈가 Tomas Edison에 의해 발명[3]된 이래로 퓨즈 선정 기법에 대한 연구가 많이 수행되었다. 하지만, 대부분의 경우 하나의 퓨즈를 이용하는 단일 퓨즈 연결 방식과 퓨즈를 병렬 연결하는 병렬 퓨즈 연결 방식을 구분하였으며, 퓨즈에 연결되는 유닛의 정확한 특성에 기반하여 퓨즈 선정에 대해 다루었다[4-8].

본 논문에서는 퓨즈 용량 선정 절차에 대해 기술하면서 단일 퓨즈 연결 방식이 병렬 퓨즈 연결 방식에 종속적임을 수학적으로 보였고, 또한, 퓨즈에 연결되는 유닛의 전류 특성이 정확하지 않을 때 적절한 퓨즈를 선정하는 기법에 대해 기술하였다. 본 논문에서는 편의상 유닛의 steady-state 전류 특성이 DC형태인 경우의 퓨즈 용량 선정 방법에 대해 기술하였다.

2. 본 론

위성 시스템 보호를 위한 퓨즈의 연결은 하나의 퓨즈를 이용하는 단일 퓨즈 연결 방식과 높은 전류를 요구하는 유닛을 위해 여러 개의 퓨즈를 병렬 연결하는 병렬 퓨즈 연결 방식이 있다 [5-6,8]. 하지만, 단일 퓨즈 연결 방식은 수학적으로 병렬 퓨즈 연결 방식에 종속적이므로 단일 퓨즈 연결 방식도 퓨즈의 병렬 연결 개수가 1개인 병렬 퓨즈 연결 방식으로 생각할 수 있다.

병렬 퓨즈 연결 방식은 단일 퓨즈 연결 방식에 비해 추가로 고려해야 할 사항이 존재하는데,

이는 퓨즈를 병렬 연결할 때에는 동일한 전압/전류 rating을 갖고 동일한 제조회사의 같은 제조과정을 통해 생산된 퓨즈를 이용해야 한다는 것이다. 이것은 병렬 연결되는 퓨즈 간의 특성차를 최소화하여 병렬 연결을 통한 성능열화(derating)을 최소화하기 위함이다.

2.1절에 단일 퓨즈 연결 방식을 포함하는 병렬 퓨즈 연결 방식에 대해 기술하였고 정확한 퓨즈 용량 선정을 위한 closed-form equation을 나타내었다. 더불어, 단일 퓨즈 연결 방식이 수학적으로 병렬 퓨즈 연결 방식에 종속적임을 나타내었다. 2.2절에는 정확한 설계 변수를 모르는 상태에서 퓨즈를 선정하는 기법에 대해 논하였다.

2.1 퓨즈 용량 선정

퓨즈 용량 선정 절차를 논하기 전에 퓨즈의 특성을 나타내는 *TDF* (Temperature Derating Factor), *PRL* (Percent of Rated Load), *PDF* (Parallel Derating Factor), *TCR* (Temperature coefficient of fuse resistance)에 대해 다음과 같이 정의하였다.

- *TDF* (Temperature Derating Factor)

우주환경에서 퓨즈가 노출되는 최대 온도에서의 퓨즈의 정격 전류용량의 열화(derating) 비율을 나타냄 (일반적으로 퓨즈의 정격 전류는 상온인 25°C에서 결정됨). 이 값은 DC 형태의 전류와 transient 형태의 전류에 대해 다른 값을 가짐. Transient 형태의 전류에 대한 *TDF*는 DC 형태의 전류에 대한 *TDF*에 비해 큰 값을 가짐.

- *PRL* (Percent of Rated Load)

퓨즈가 blow-out되지 않는 최소의 transient current 한계 값(Lower Blow Limit). 이 값은 transient current의 duration에 대응되고, 퓨즈의 정격전류 값과의 비율로 나타냄.

- *TCR* (Temperature coefficient of fuse resistance)

퓨즈 주변 온도 변화에 따른 퓨즈 저항 값 변화율 (퓨즈의 저항 값은 상온인 25°C에서

결정됨).

- **PDF (Parallel Derating Factor)**

퓨즈가 병렬 연결됐을 때 퓨즈끼리의 저항 차이로 인한 퓨즈 용량 열화(derating) 비율. 이는 저항 값의 불균형 때문에 각 퓨즈에 흐르는 전류 값에 차이 때문에 발생됨. 하나의 퓨즈에 최대 흐를 수 있는 전류 값(maximum current flow)과 퓨즈끼리 저항 값이 동일했을 때 하나의 퓨즈에 흐르는 전류 값(nominal current flow)과의 비율로 나타냄. 퓨즈의 저항이 동작온도에 따라 변하므로 *TCR*을 고려하여 *PDF*를 결정함.

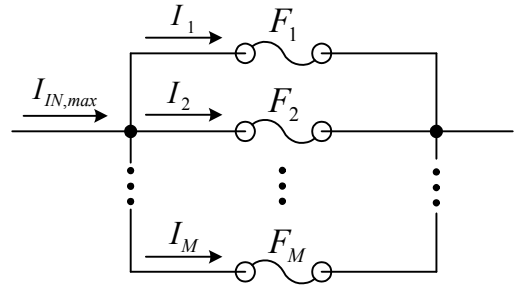


그림 1. 퓨즈의 병렬연결

퓨즈 용량 선정은 다음과 같은 절차에 의해 수행된다.

- 1) 퓨즈에 연결되는 유닛의 최대 steady-state DC 전류 기준으로 퓨즈 용량 선정. Derating factor (DF_{DC})는 DC 형태의 전류에 대한 TDF_{DC} 와 PDF 를 곱한 값임 (i.e., $DF_{DC} = TDF_{DC} \times PDF$). 단일 퓨즈 연결 방식일 경우 PDF 는 1이 됨. 퓨즈 용량은 최대 steady-state DC 전류에 derating factor (DF_{DC})를 나눈 값으로 결정됨.
- 2) 퓨즈에 연결되는 유닛의 최대 transient 전류 값을 기준으로 퓨즈 용량 선정. Derating factor (DF_{TR})는 transient 형태의 전류에 대한 TDF_{TR} 와 PDF 및 PRL 을 곱한 값 (i.e., $DF_{TR} = TDF_{TR} \times PDF \times PRL$). 퓨즈 용량은 최대 transient 전류에 derating factor (DF_{TR})를 나눈 값으로 결정됨.
- 3) 1)과 2)에서 구한 퓨즈 용량 중 큰 값을 기준으로 최종적으로 퓨즈 용량 선정.

위와 같은 절차를 바탕으로 자세한 퓨즈 용량 선정 방법은 다음과 같다.

그림 1은 동일한 전류 rating을 갖는 M 개의 퓨즈를 병렬 연결한 형태를 나타낸다. 여기에서 M 은 1이상의 값을 가진다. 계산을 간단히 하기

위해 퓨즈에 연결된 도선 및 도선 연결부(mating contact)의 저항 값을 0으로 가정하였다. $I_{IN,max}$ 는 퓨즈에 연결돼 있는 유닛으로 입력되는 최대 입력 전류를 나타내고, $\{I_k\}_{k=1}^M$ 는 각 퓨즈로 흐르는 전류를 나타낸다. $\{I_k\}_{k=1}^M$ 의 값은 M 개의 퓨즈의 저항 값의 비율에 따라 결정되는데, M 개의 퓨즈의 용량은 임의의 k 번째 퓨즈로 입력될 수 있는 최대 전류 값($I_{k,max}$)을 기준으로 결정된다.

퓨즈의 저항 값은 일반적으로 상온(25°C)에서 측정되고 임의의 오차(ϵ) 값을 가지게 된다. 즉, 퓨즈의 최대 저항 값과 최소 저항 값은 식 (1)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$R_{min} = (1 - \epsilon)R_{max}, \text{ where } 0 < \epsilon < 1 \quad (1)$$

하지만, 인공위성에 쓰이는 퓨즈는 상온보다 훨씬 높은 온도를 가지는 우주환경에 노출되므로 식 (2)와 같이 worst case 동작온도($x^\circ\text{C}$)에서의 최대, 최소 저항 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R'_{max} &= R_{max} \{1 + TCR(x - 25^\circ\text{C})\}, \\ R'_{min} &= R_{min} \{1 + TCR(x - 25^\circ\text{C})\}. \end{aligned} \quad (2)$$

M 개의 퓨즈는 동일한 회사의 동일한 제조과정을 거쳤음을 가정하면, 공통적으로 식 (2)에 나타낸 최대, 최소 저항 값을 가진다 할 수 있다. 이렇게 구해진 최대, 최소 저항 값을 이용해 하나의 퓨즈로 입력되는 최대 전류를 구할 수 있다. 즉, k

번째 퓨즈는 최소 저항 값(R'_{min})을 가지고, 나머지 $(M-1)$ 개의 퓨즈는 최대 저항 값(R'_{max})을 가질 때 k 번째 퓨즈에 흐르는 전류가 최대 전류 값이 된다. 따라서 k 번째 퓨즈에 흐르는 최대 전류 값($I_{k,max}$)은 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 식 (3)의 첫 번째 줄에서 두 번째 줄로 넘어갈 때 식 (2)를 이용하였다.

$$\begin{aligned}
 I_{k,max} &= \frac{\frac{1}{R'_{min}}}{\frac{1}{R'_{min}} + \frac{M-1}{R'_{max}}} \times I_{IN,max} \\
 &= \frac{R'_{max} I_{IN,max}}{R'_{max} + (M-1)R'_{min}} \\
 &= \frac{I_{IN,max}}{1 + (M-1)(1-\epsilon)}
 \end{aligned} \quad (3)$$

만약 M 개의 퓨즈의 저항 값이 동일하다면 k 번째 퓨즈에 흐르는 최대 전류 값은 전체 입력 전류를 M 등분한 값($I_{IN,max}/M$)이 되게 된다. 따라서 식 (3)과 $I_{IN,max}/M$ 을 이용해 다음과 같이 PDF 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 PDF &= \frac{I_{IN,max}/M}{I_{k,max}} = \frac{I_{IN,max}/M}{\frac{I_{IN,max}}{1 + (M-1)(1-\epsilon)}} \\
 &= 1 - \epsilon + \frac{\epsilon}{M}
 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에 나타난 바와 같이, 퓨즈가 병렬 연결되었을 때 퓨즈끼리의 저항 차이로 인한 퓨즈 용량 열화 비율(PDF)은 퓨즈의 동작온도($x^\circ C$)와 저항 값 자체와는 관련이 없고 오직 저항 오차(ϵ)와 퓨즈 병렬연결 개수(M)에만 관련이 있음을 알 수 있다. 또한, M 이 1일 때에는 PDF 가 1이 되므로 단일 퓨즈 방식이 수학적으로 병렬 퓨즈 연결 방식에 중속적임을 알 수 있다.

식 (4)를 이용해 steady-state DC 형태의 전류에 대한 derating factor (DF_{DC})와 transient 형태의 전류에 대한 derating factor (DF_{TR})는 다음과

같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 DF_{DC} &= TDF_{DC} \times PDF \\
 &= \left(1 - \epsilon + \frac{\epsilon}{M}\right) TDF_{DC} \\
 DF_{TR} &= TDF_{TR} \times PDF \times PRL \\
 &= \left(1 - \epsilon + \frac{\epsilon}{M}\right) TDF_{TR} PRL
 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 이용해 steady-state DC 전류에 대한 적정 퓨즈 용량($I_{F,DC}$)과 transient 형태의 전류에 대한 적정 퓨즈 용량($I_{F,TR}$)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{F,DC} &= \frac{I_{DC}/M}{DF_{DC}} \\
 &= \frac{I_{DC}}{\{M - (M-1)\epsilon\} TDF_{DC}} \\
 I_{F,TR} &= \frac{I_{pk}/M}{DF_{TR}} \\
 &= \frac{I_{pk}}{\{M - (M-1)\epsilon\} TDF_{TR} PRL}
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 I_{DC} 와 I_{pk} 는 각각 최대 steady-state DC 전류 값과 최대 transient 전류 값을 나타낸다. 마지막으로 최종적인 퓨즈 용량(I_F)은 $I_{F,DC}$ 와 $I_{F,TR}$ 중에 더 큰 값으로 선정된다. 이것을 수식으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{cases} I_F = I_{F,DC}, & \frac{I_{pk}}{I_{DC}} < \frac{TDF_{TR} PRL}{TDF_{DC}} \\ I_F = I_{F,TR}, & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

2.2 대략적인 설계변수를 바탕으로 하는 퓨즈 선정 기법

위성 시스템을 설계할 때에 퓨즈 용량 선정은 퓨즈에 연결되는 유닛의 전류 특성이 정확히 알려진 상태에서 이루어져야 한다. 하지만, 유닛 제작이 일정보다 늦어지는 경우에는 유닛 전류 특

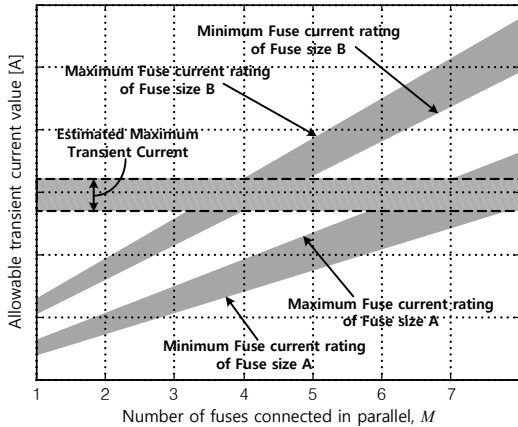


그림 2. 대략적인 설계변수를 바탕으로 하는 퓨즈 선정 기법

성이 정확히 알려지지 않아 퓨즈를 포함하는 전원 시스템 제작일정에 영향을 주게 된다. 따라서, 본 절에서는 유닛의 대략적인 전류 특성만 알려진 상황에서 전체 사업 일정 지연을 최소화하기 위한 적절한 퓨즈 선정 기법에 대해서 논하였다.

유닛 특성이 정확히 알려지지 않은 상태에서 적절한 퓨즈 용량 선정하기 위해서는 우선, 위성 heritage가 있는 퓨즈를 공급할 업체를 선정해야 한다. 퓨즈 공급업체가 선정되면 업체의 퓨즈 제품군에 대한 특성 상수(저항 오차(ϵ), TDF_{DC} , TDF_{TR} , PRL)를 식 (6)에 대입해 적절한 퓨즈를 선정할 수 있다.

식 (6)을 변형하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{DC} &= I_{F,DC} \{M - (M-1)\epsilon\} TDF_{DC} \\ I_{pk} &= I_{F,TR} \{M - (M-1)\epsilon\} TDF_{TR} PRL \end{aligned} \quad (8)$$

$I_{F,DC}$ 와 $I_{F,TR}$ 는 퓨즈 공급업체의 퓨즈 용량이 되고, I_{DC} 와 I_{pk} 는 각각 퓨즈 용량을 $I_{F,DC}$ 와 $I_{F,TR}$ 로 설정했을 때 최대 허용하는 steady-state DC 전류 값과 최대 transient 전류 값을 나타낸다. 저항 오차(ϵ), TDF_{DC} 와 TDF_{TR} , PRL 은 퓨즈 공급업체의 고유한 값이므로 상수값으로 설정할 수 있다. 단, 퓨즈가 우주환경에 최대 노출되는 온

도 값이 결정되어야 TDF_{DC} 와 TDF_{TR} 값이 설정되고, transient 형태의 전류의 duration이 결정되어야 PRL 을 설정할 수 있다. 만약 duration 값에 대한 정보가 없다면 worst case를 고려하여 PRL 값을 설정하는 것이 적절하다.

식 (8) 외에 추가로 고려해야 할 사항이 있는데, 그것은 퓨즈의 용량이 커지면 퓨즈의 물리적인 크기 또한 커진다는 것이다. 단, 퓨즈의 용량과 크기는 선형적인 관계가 아니다. 예를 들어, 10A 미만의 퓨즈는 작은 크기(A size)를 가지고, 10A 이상의 퓨즈는 더 큰 크기(B size)를 가지게 된다. 따라서, 어떤 크기의 퓨즈를 몇 개의 병렬 연결 개수로 연결하느냐에 따라 전원 시스템의 PCB에서 퓨즈가 차지하는 공간이 달라지게 된다.

식 (8)과 퓨즈의 물리적인 크기를 감안해서 적절한 퓨즈를 선정할 수 있는데, 이를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 음영 부분은 Transient 형태의 전류에 대해 퓨즈의 크기별, 병렬연결 개수별로 퓨즈가 견딜수 있는 최대/최소 전류를 나타낸다. DC 형태의 전류에 대한 그래프는 그림 2와 유사하므로 별도로 나타내지 않았다. 앞에서 언급했듯이, transient 형태의 전류에 대해서는 DC전류와 다르게 duration 변수를 추가적으로 고려해야 한다. Duration이 변하면 식 (8)에서 PRL 값이 변하므로 그림 2의 음영부분의 기울기가 변하게 된다.

퓨즈가 크기에 따라 견딜 수 있는 전류 크기가 결정되면, 즉, 그림 2의 음영부분이 결정되면, 대략적으로 예상되는 transient 및 DC 전류의 크기를 기준으로 적절한 퓨즈의 물리적 크기와 병렬 연결 개수를 선정할 수 있다. 그림 2에 나타난 상황에서는, 대략적으로 예측되는 transient 전류 값(점선부분)에 대해 size B인 퓨즈 4개를 병렬 연결하는 방안과 size A의 퓨즈 7~8개를 병렬 연결하는 방안이 적절하다는 결론을 얻을 수 있다.

위에서 설명한 “대략적인 설계변수를 바탕으로 하는 퓨즈 선정 기법”은 설계변수의 worst case를 바탕으로 퓨즈의 물리적 크기(용량)와 병렬연결 개수를 선정했으므로 유닛의 실제 전류

특성이 예상한 전류 값보다 작을 가능성이 높다. 따라서, 그림 2에서 선택된 두 가지 옵션 중에는 size A의 퓨즈 7~8개를 병렬 연결하는 방안이 더 적절하다고 할 수 있다. 즉, 유닛의 실제 전류 특성에 가장 가깝게 퓨즈용량을 선정하기 위해서는 퓨즈의 병렬 연결 개수가 많을수록 유리하기 때문이다. 물론, 퓨즈의 병렬 연결 개수가 너무 커지면 전원 시스템의 PCB에 퓨즈가 차지하는 영역이 너무 커지므로 이 또한 고려해야 할 것이다.

4. 결 론

인공위성에서 장착되는 퓨즈의 적절한 용량 선정 기법에 대해 논하였다. 퓨즈 용량 선정 절차에 대해 논하였고, 그 과정 중에 단일 퓨즈 연결 방식이 병렬 퓨즈 연결 방식에 수학적으로 종속적임을 보였다. 마지막으로, 퓨즈에 연결되는 부하의 대략적인 전류 특성만 알려진 상황에서의 적절한 퓨즈 선정 기법에 대해 새롭게 논하였다.

참 고 문 헌

1. ECSS-E-20A, *Space Engineering - Electrical and electronic*, Noordwijk, The Netherlands, Oct. 1999.
2. Walter Schossig, "Introduction to the history of selective protection," *PAC Magazine*, Summer 2007, pp.70-74.
3. T. A. Edison, "Patent of fuse block," 1890. US 438305.
4. U. Grasselli, "Fuse overcurrent behaviour for selectivity and reliability evaluation of protection systems," *6th Int. Symposium on Short-Circuit Currents in Power System*, Liège, Belgium, Sept. 1997.
5. 김영학, 진영근, 김진철, "다목적실용위성의 퓨즈용량 설계 및 할당," *한국항공우주학회 1997년 추계학술발표회 논문집*, Vol. 1, Nov. 1997, pp. 682-685.
6. 구자춘, 이진호, 백명진, 김학정, "아리랑

- 2호에서 퓨즈 용량 선정에 관한 연구," *한국항공우주학회 2001년 추계학술발표회 논문집*, Vol. 1, Apr. 2001, pp. 528-531.
7. U. Grasselli, L. Schirone, A. De Luca, "Overcurrent protection performance evaluation," *Space Power, Proceedings of the Sixth European Conference*, May 2002.
8. 구자춘, 이진호, 이니영, 김학정, "인공위성에서 병렬 퓨즈 용량 선정 및 퓨즈 개방 시간 해석," *한국항공우주학회 2002년 추계학술발표회 논문집*, Vol. 1, Nov. 2002, pp.694-697.