

형광등용 전자식 안정기의 신뢰성 평가를 위한 접근

An Approach to Evaluate Reliability of Electronic Ballasts for the Fluorescent Lamp

전 태 보 장 목 순 박 중 연
Jeon, Tae Bo Jang, Mok Soon Park, Chong Yeon

강원대학교 공과대학 산업공학과
강원대학교 IT특성화학부 전기전자공학전공
강원대학교 IT특성화학부 전기전자공학전공

Abstract

A simple but practical approach to evaluate the reliability of electronic ballasts for the low wattage fluorescent lamp has been presented in this study. We briefly reviewed the basic concepts of the electronic ballast. We then proposed a simple model and evaluated the reliability of the ballast using computer simulation.

keywords: ballast, reliability prediction, simulation

1. 서론

부성 저항(negative resistance)을 갖는 형광램프는 높은 점등 전압과 점등 후 램프의 전류를 제한하는 안정기가 필요하다. 자기식 안정기의 큰 부피, 낮은 효율성, 그리고 나쁜 특성 등의 단점을 극복하기 위해서 램프를 수십 kHz에서 동작시키는 전자식 안정기로 광 효율이 증가하고, 크기가 작고 가벼우며 조광 제어기와 결합하여 최대 50-70% 이상의 전력 소비를 줄일 수 있다. 따라서 현재 형광등용 안정기로는 고주파 전자식 안정기의 사용이 계속 증가하고 있다.

전자식 안정기는 기존의 자기식 안정기에 비해 많은 수의 전자 소자로 이루어졌다. 따라서 전자식 안정기의 신뢰성은 자기식에 비해 검토가 복잡하고 어렵다. 그럼에도 불구하고 전자식 안정기의 각 소자 특성을 고려한 신뢰성 검토를 통해 안정기를 제조하는 업체에서 보다 신뢰성이 향상된 안정기를 생산할 수 있을 뿐 아니라 수명에 영향을 주는 특정 부품의 품질이 높은 것으로 사용하거나 보호회로를 추가하므로 안정기의 수명을 향상시킬 수 있는 근거를 마련한다.

안정기의 경우, 신뢰성 평가를 위한 모형 설정이 미미한 실정이다. 특히, 형광등 안정기의 보급에 비하여 그의 신뢰성 연구는 대단히 제한적이다. 연구 및 분석이 수행되더라도 전체 시스템 보다는 캐패시터(capacitor)나 권선(coil) 등 특정 부품에 대한 가속 수명 시험(accelerated life test) 결과를 바탕으로 한 시스템 수명과 신뢰성 예측에 초점을 가진다 [1,2]. 최근, 안정기 전체에 대한 신뢰성 모형 수립을 위한 연구가 수행되었으며 특별히, Telcordia를 이용하여 각 부품별 신뢰도를 구한 뒤 이들을 총체화하는 방법으로 진행되었다 [3].

본 연구에서는 안정기의 신뢰성을 예측하기 위하여 이 양자의 중간 형태인 일부 핵심 소자들을 중심의 간략화 된 모형을 바탕으로 신뢰성 검토 방법을 제시하고자 한다. 연구수행을 위하여 먼저 형광등용 전자식 안정기에 대한 개괄적인 내용을 고찰한다. 그리고는, 안정기의 신뢰성 측면에서 핵심적으로 고려되는 부분을 중심으로 모형을 수립한다. 이 과정에서 소자들의 수명 및 안정기의 수명과 관련된 전기적 특성을 도출한다. 마지막으로, 시뮬레이션을 통한 신뢰성 검토를 수행함으로써 체계적인 분석의 기틀을 마련한다.

2. 형광등 안정기

안정기의 목적은 램프가 최적의 동작을 하도록 램프에서 요구되는 전압과 전류를 공급하는 것이다. 따라서 안정기의 특성은 램프에 영향을 주며 또한 안정기의 부하인 램프의 특성은 안정기에 상호 영향을 준다. 따라서 안정기의 신뢰성 검토를 위해서는 안정기와 램프를 하나의 시스템으로 하여 분석할 수 있다.

본 연구에서는 타력식(external oscillation) 안정기를 대상으로 하며, 신뢰성 검토를 위해

사용된 전자식 안정기의 회로는 그림 1과 같다. EMI(electric magnetic interference) 필터는 역률 개선 회로와 인버터(inverter)의 스위칭에 의해서 발생한 common mode noise와 different mode noise를 전원으로 삽입되지 못하도록 제한하여 다른 전자기기에 영향을 받지 않도록 한다. 정류기(rectifier)는 60Hz 교류전원을 직류 전원으로 변환하는 역할을 하며, 역률개선(PFC: power factor correction) 회로는 시스템의 입력 전원의 용량성 잡음과 고조파를 감소시켜 시스템 입력 전력의 효율을 향상시킨다. PFC는 수동형과 능동형이 있으며, 본 연구에서 대상으로하는 수동형은 수동소자와 다이오드(diode)만 사용하였다. 인버터(inverter)는 직류 전압을 스위칭을 통해서 고주파(40kHz)의 교류 구형파로 변환시킨다. 즉, 직류전압을 캐패시터(C)와 코일(L)을 가지고 전하가 충전과 방전을 되풀이하게 만들어 공진하게 해 교류전압으로 바꾸어준다. 이렇게 변환된 구형파는 LC 공진 회로에 의해서 고주파 정현파로 변환하여 램프의 입력으로 한다.

그림에서 보듯이 안정기를 구성하는 소자들이 대단히 많으며 각각의 전기적 특성 및 신뢰도가 전체 안정기의 신뢰성을 결정한다. 문제는 개별 소자들의 신뢰성에 대한 완전한 정보가 부족하며 이들이 독립이 아닌 종속적 특성을 소유하므로 관계를 명확히 규명함을 포함하는 이론적 수리 모형의 수립이 어렵다.

이의 대안으로 전체의 안정기보다는 특정 부품들을 중심으로 안정기의 수명 특성을 해석하려는 시도가 가능하다. 본 연구에서는 안정기의 입력(전단)부분 보다는 일부 출력(후단) 소자들의 전기적 특성이 전체 안정기의 수명에 결정적인 영향을 미친다는 가정하에 이들을 중심으로 안정기 신뢰성을 분석한다. 즉, 그림 1의 회로에서 신뢰성 측면에서 주요한 소자들을 선택하여 간략화된 모형을 수립하고 신뢰성을 검토하므로써 전체 안정기의 신뢰성 및 수명을 검토하고자 한다.

3. 안정기 등가 모형의 수립

안정기의 신뢰성에 주된 영향을 미치는 부분으로는 높은 전압과 전류에서 동작하며 또 산업현장에서의 신뢰성에 관한 경험들에 근거할 때 LCC 공진회로의 캐패시터와 인덕터, 램프, 스위치 등이 고려된다. 이 소자들을 중심으로 고려할 때 안정기는 그림 2와 같이 이들의 직렬구조(series structure)로 표현이 가능하다. C5 (또는 C6), 코일, 그리고 C9는 LCC를 구성한다. 이제 캐패시터(C5 또는 C6)를 시작으로 전류가 코일, 램프, 그리고 스위치를 통과하게 된다. 이 과정이 계속 반복되며 각 소자를 지나면서 전기적 특성들이 변하고 소자 및 안정기 신뢰성에 영향을 미치게 된다. 그림에서 소자별 관련되는 주요 전기적 특성들이 함께 도시되었다.

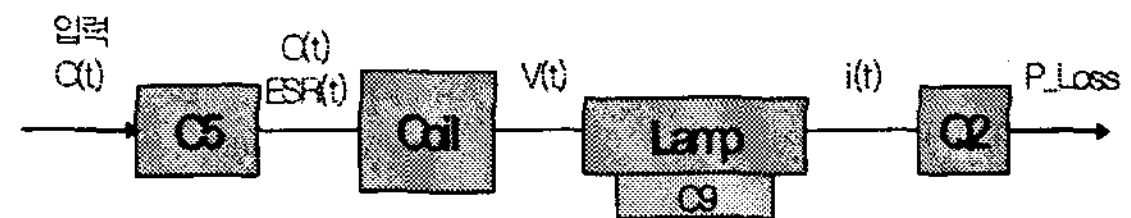


그림 2 신뢰성 고찰을 위한 소자들

1) Serial Capacitor: C5 (C6)

캐패시터는 초기 시점에서 특정 용량(C(0))을 가지며, 작동 시간이 경과함에 따라 용량이 변한다. 즉, 시점 t에서 용량(C(t))을 가지며 캐패시터를 통과한 전류는 LC 부분으로 진입되며, 용량의 변화는 램프에도 영향을 주게 된다. 안정기에 영향을 미치는 캐패시터의 또 다른 성분으로 ESR(equivalent series resistance)을 들 수 있다. ESR은 저항 성분으로 시간에 따라 증가가 예상되며 이로 인한 전력의 소비로 열이 발생하고 캐패시터의 수명 뿐 아니라 안정기의 효율성에도 영향을 미친다. 캐패시터 내의 ESR 값 평가를 위한 공식으로는 식 (1)을 가정한다.

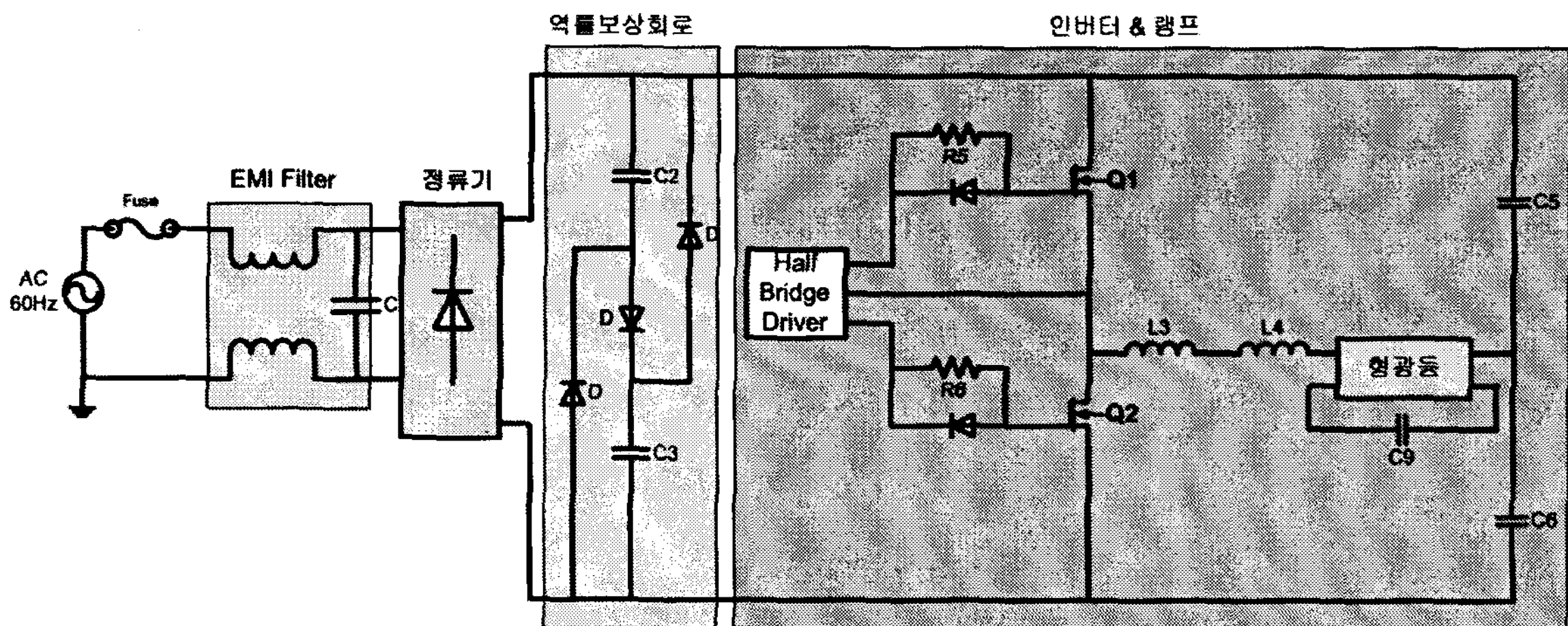


그림 1 전자식 안정기의 회로도

$$ESR(t) = ae^{bt} \quad (1)$$

이 식은 특정 부품을 대상으로 한 필드 데이터[4]를 기준으로 설정되었으며, 초기 ESR 값은 0.3(ohm)으로 가정하였다. 상수 a, b는 설정된 회귀식(regression model)을 데이터에 적합화 함으로써 구할 수 있다.

2) LCC 공진회로

LCC 공진회로는 수백 볼트, 수십 kHz의 구형파를 정현파로 필터링한다. L과 직렬로 연결되어 있는 캐패시터 C5는 램프에 입력되는 전압의 크기를 결정한다. 시점 t에 공진회로에서의 전달함수 H(C(t)) 및 출력전압은 식 (2)(3)과 같다.

$$H(C(t)) = \frac{\omega R_s C(t)}{\sqrt{(1 - \omega^2 L C(t))^2 + [\omega R_s C(t) + C_0] \left(1 - \frac{\omega^2 L C(t) \cdot C_0}{C(t) + C_0}\right)^2}} \quad (2)$$

$$V(t) = V_{DC} \cdot H(C(t)) \quad (3)$$

단, V_{DC} - DC 링크 전압

3) 램프

램프는 안정기의 부하로써 공진회로를 통하여 공급되는 전압에 의해서 동작되며 또한 램프의 전압, 전류특성은 안정기에 영향을 미친다. 시점 t에서 램프에서의 출력 전류는 식 (4)와 같다[5].

$$i(t) = \frac{V(t)}{R_s} \quad (4)$$

이 식에서 R은 램프의 저항을 나타낸다.

4) 스위칭 용 MOSFET

스위칭 용 MOSFET는 일정 볼트의 전압 및 암페어의 전류를 수십 kHz로 스위칭하므로 전력의 손실이 발생하게 된다. 이 전력의 손실은 열로 발산하며, 발산된 열이 과도할 때 스위칭 용 MOSFET가 파손된다. 스위칭 용 MOSFET에서의 전력손실은 식 (5)(6)의 전도손실(P_{Cond}), 스위칭 손실(P_{SW})을 통하여 식 (7)과 같이 구해진다[6].

$$P_{Cond} = i^2(t) \cdot R_{DS} \quad (5)$$

$$P_{SW} = \alpha \cdot t \cdot f_{SW}^2 \quad (6)$$

$$P_{Loss} = P_{Cond} + P_{SW} \quad (7)$$

단, R_{DS} - 스위치 도통시 drain과 source간의 저항
 f_{SW} - 스위칭 주파수

이상의 과정이 계속 반복함을 가정하며 각 소자를 통할 때의 전기적 특성은 시간에 따라 변하게 된다. 본 연구에서는 그림 3과 같이 안정기 신뢰성 평가를 위한 간략화 된 등가모형을 설정하였다. 즉, 그림 1의 회로와 동일하게 양단에 2개의 캐패시터와 2개의 스위치 소자를 두었으며 C5를 시작으로 전류는 LC 및 램프를 거쳐 Q2를 지난다. Q2를 통과한 전류는 이번에는 C6, LC, 램프, 그리고 Q1을 통과하면서 한 사이클을 완성하게 된다. 이 과정이 40kHz의 경우 실제로는 1초에 40,000회 반복됨을 의미한다. 동시에 시간에 따라 전기적 특성 값이 변하므로 소자들에게 영향을 미치거나 일정 영역 밖으로 벗어날 때 소자나 안정기의 수명에 결정적인 영향을 미치게 된다.

설정된 모형을 중심으로 안정기 신뢰성을 고찰할 때 특별히, 캐패시터의 용량이 입력 변수로서 필요하다. 캐패시터는 누적 동작시간에 따라 용량이 감소함으로, 본 연구에서는 동작시간에 따른 캐패시터의 용량을 필드데이터[4]를 중심으로, 식 (8)과 같이 초기 용량으로부터 선형적 감소 형태로 정의한다. 즉,

$$C(t) = C_0(1 - kt) \quad (8)$$

단, C_0 - 초기 용량

여기서 C_0 값은 제조회사별, 형태별, 용량별로 다르다.

3. 시뮬레이션을 통한 신뢰성 검토

안정기의 신뢰성을 고찰하기 위하여 앞 절에서 설정된 모형을 바탕으로 시뮬레이션 모형을 수립하였다. 전체적인 로직은 그림 3의 정의를 바탕으로 하며 전반적인 가정은 다음과 같다.

- 캐패시터 C5, C6의 초기용량은 정격 용량 (120nF)으로부터 약간의 오차를 통하여 정의한다. 특별히, 이들의 초기 용량은 각각 정격으로부터 $\pm 10\%$ 의 오차를 가정한다. 즉, 구형분포 [108, 132]로부터 생성한다.
- 시간이 흐름에 따라 C5, C6의 용량은 초기에 정의된 용량으로부터 일정량 씩 감소한다.

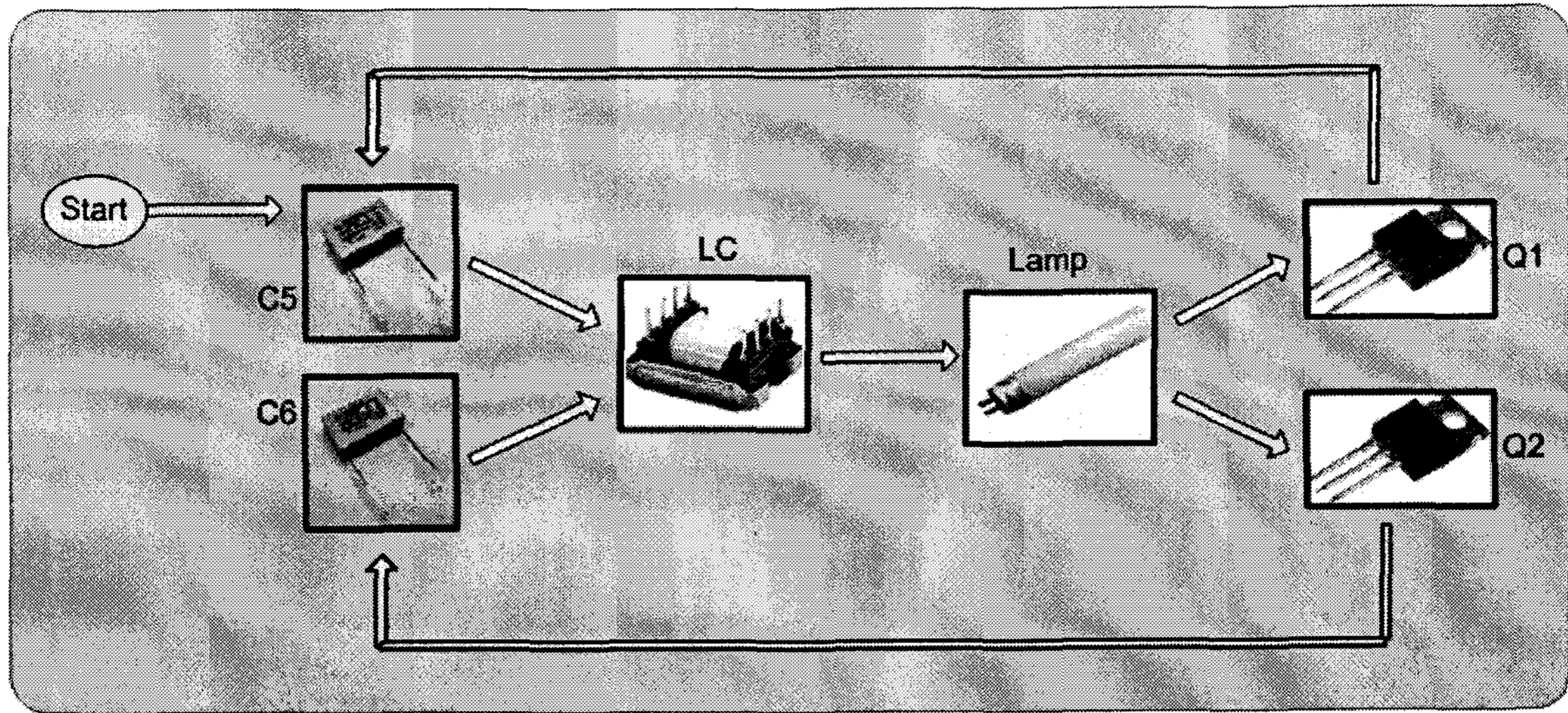


그림 3 간략화 된 안정기 신뢰성 모형

본 연구에서는 특정회사의 캐패시터를 대상으로 조사를 하였으며 4000시간 후 약 3%의 용량이 감소함에 비추어 식 (8)의 계수 값을 $k=0.0000075$ 로 가정하였다.

- ESR 평가는 식(1)을 통하여 수행된다. 특정 회사의 자료에 상술한 회귀식을 적합한 결과 $a=0.9675$, $b=0.000077$ 을 얻었다.

시뮬레이션을 위한 모형을 수립하였으며 다음과 같이 요약된다.

초기화: 시점을 $t=0$ 로 설정하고 모든 파라미터 값들을 초기화한다. 이에는 통계적으로 생성한 C5, C6의 초기치도 포함된다. 시뮬레이션을 위하여 설정된 초기치들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 120(nF) & C_9 &= 6.8(nF) \\
 L &= 2.1(mH), & V_{DC} &= 150 \\
 R_s &= 520(ohm), & \omega &= 2\pi f \\
 f &= 47000, & \alpha &= \frac{80}{30000} \\
 R_{DS} &= 1(ohm), & &
 \end{aligned}$$

단계 1: 시점 t 의 C5 용량을 식(8)로부터 생성한다. 동시에 식 (1)의 ESR을 평가한다.

단계 2: $C(t)$ 를 이용하여 식 (2)(3)의 전달함수 및 전압을 평가한다. 이 값은 램프의 입력 값으로 적용되며 식 (4)에 의한 전류 값을 생성한다.

단계 3: 스위칭 소자(Q2)에 대하여 식 (7)의 전력 손실 값을 산출한다.

단계 4: 단계 1-3의 과정을 C6, L, 램프, 그리고 Q1에 대해서 반복한다.

* 단계 1-4의 C5 및 C6에 대한 전기적 특성의 평가를 통하여 한 사이클이 완성된다.

단계 5: 시간을 $t=t+\Delta t$ 로 진행시킨다. t 가 초기 설정한 최대 시간을 초과한 경우 시뮬레이션을 종료한다. 아니면, 단계 1로 간다.

이상의 과정을 50,000시간 동안 시뮬레이션을 수행하였으며 매 1000시간 마다 소자별 전기적 특성 값을 수집하였다. 그림 4-8은 동작 시간 변화에 따른 주요 특성치들의 변화를 도시한 내용이다.

그림 4는 시간에 따른 캐패시터 용량(capacitance)의 변화로, 초기 용량이 각각 116.62와 113.68nF으로 주어졌다. C5, C6에 있어 약 23000과 21000 시간 후 캐패시턴스는 정격 용량의 약 80%(96nF)로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 동작 시간에 따른 캐패시턴스의 감소는 LCC 공진탱크 회로 전달함수의 특성 곡선을 증가시켜 (그림 5) 공진 주파수를 증가시키고, 궁극적으로 램프의 전압과 전류를 증가시킨다.

또한 동작 시간이 경과 할수록 캐패시터의 ESR이 증가하여 (그림 4), 캐패시터 내부의 Joule 열을 발생시켜 캐패시터의 수명을 단축시킬 뿐 아니라 캐패시턴스를 더욱 감소시키고

전력의 손실을 가져와 안정기의 효율을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 전자식 안정기의 효율과 긴 수명을 보장하기 위해서는 ESR이 작은 캐패시터를 사용하는 것이 유리하다.

그림 6, 7의 램프의 전압과 전류의 변화는 50,000시간 동안 각각 4.5V, 0.04A 정도 증가하여 동작 시간에 대해 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉, 캐패시터 C5, C6의 변화가 램프의 수명에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이는 전자식 안정기에서 수명에 대한 민감도가 낮음을 의미한다.

그림 8은 스위칭 소자 Q1, Q2의 스위칭 손실을 전도손실(conduction loss)과 스위칭 손실(switching loss)의 합으로 구한 것으로, 동작 시간이 경과할수록 손실이 증가하며 이러한 전력 손실은 스위칭 소자에 동작 온도를 상승시켜, 스위칭 소자의 수명에 결정적인 영향을 가져온다. 동작 시간이 50,000시간 이후 스위칭 소자의 전력 손실은 30W 이상으로 이는 78°C 이상의 온도를 발생시켜 정격 온도가 80°C 인 스위칭 소자의 고장이 예상된다[6].

결론적으로, 전자식 안정기는 동작 시간이 경과함에 따라 직렬 캐패시터 C5, C6의 용량이 감소하고, ESR이 증가한다. 이것은 LCC의 특성을 변화시켜 램프의 전압과 전류의 증가시키지만 램프의 수명에 영향을 줄 만큼은 아니라는 결론이다. 반면, 스위치의 전력 손실은 동작 시간의 증가에 따라 심각하게 증가되어 50,000 시간 이후에는 스위치의 동작을 보장할 수 없는 것으로 나타났으며, 이것은 산업현장에서의 전자식 안정기의 고장 특성과 일치하는 것으로 나타났다. 결국, 램프의 전압, 전류가 시간이 경과하면 정격에서 크게 벗어나고 스위치 소자의 발열이 심해져서 안정기의 파손으로 이루어진다.

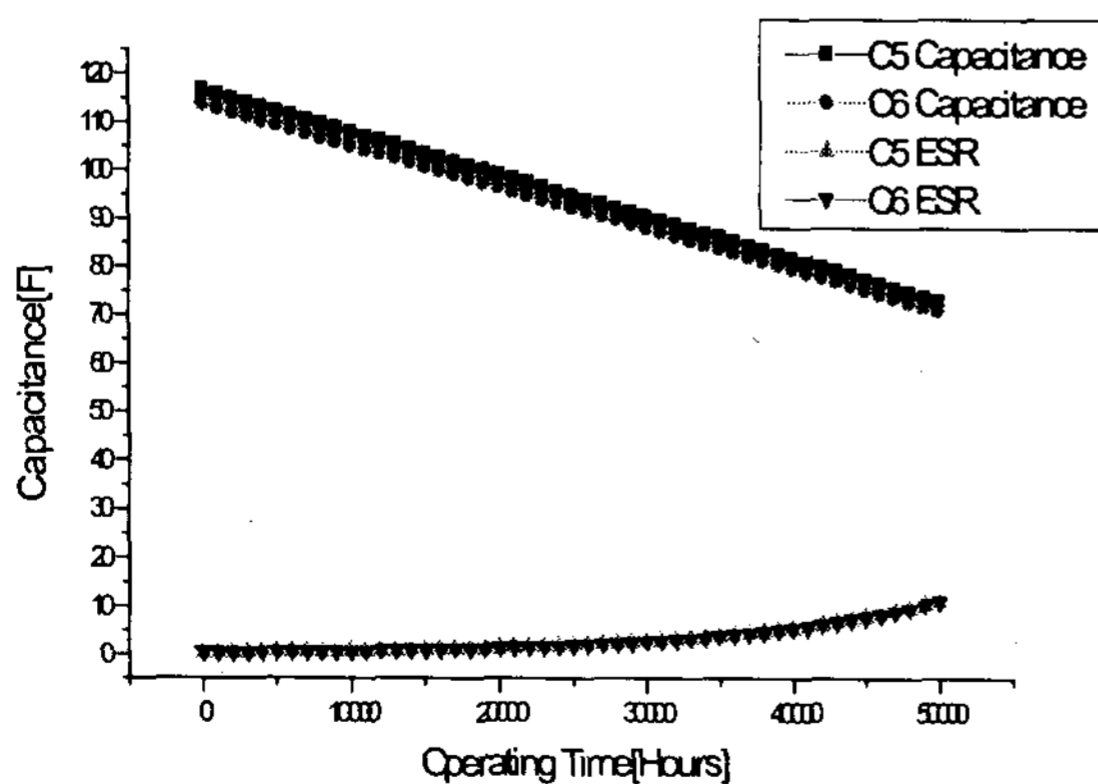


그림 4 캐패시터 용량과 ESR의 변화

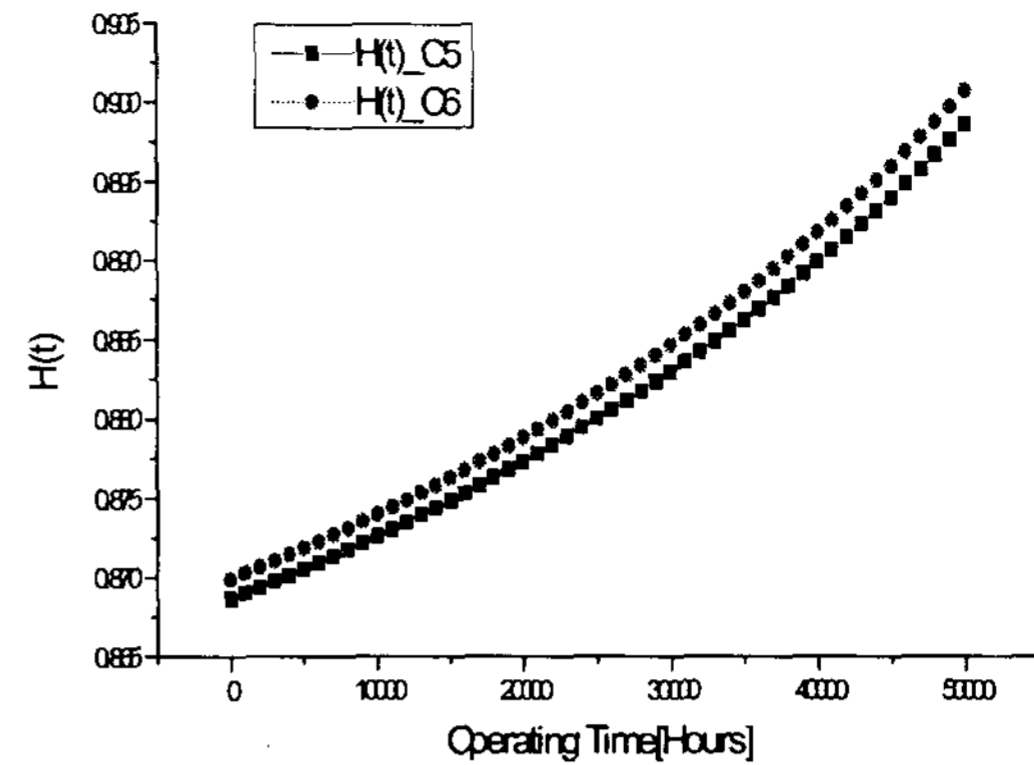


그림 5 LCC 전달 특성의 변화

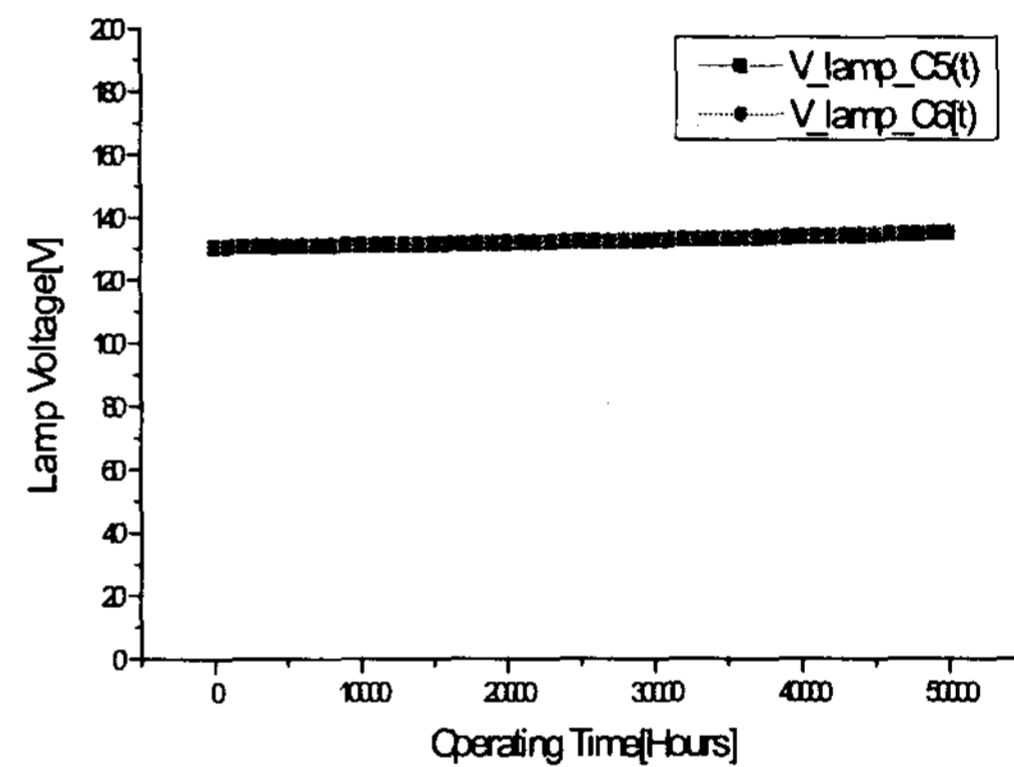


그림 6 Lamp 전압의 변화

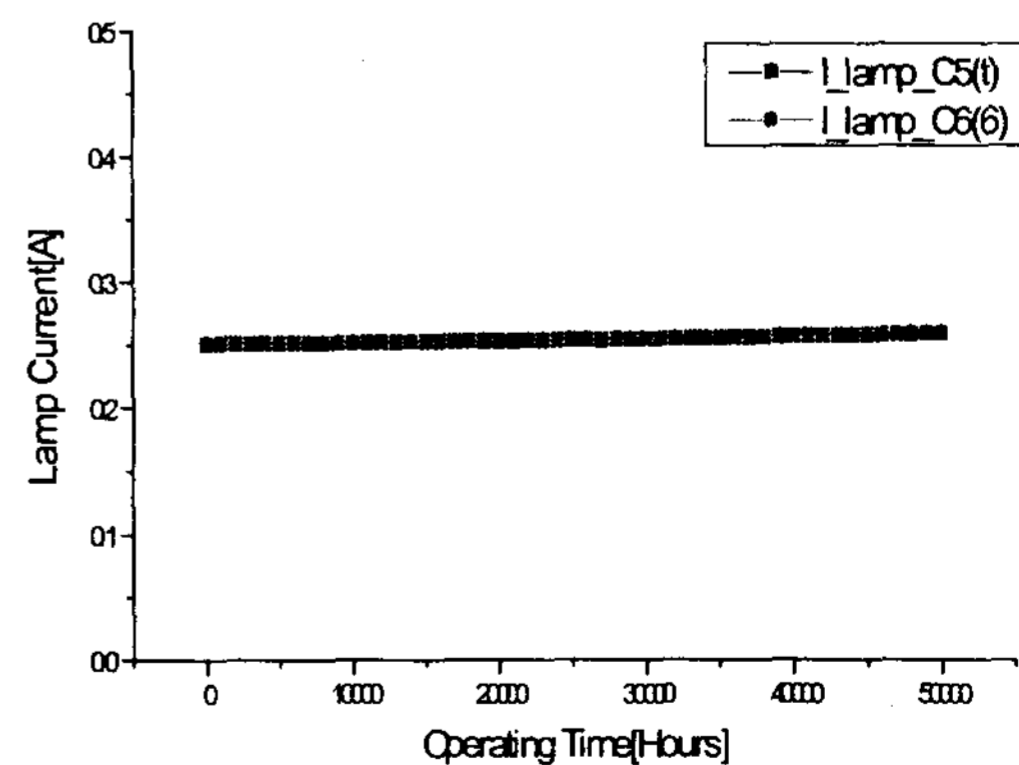


그림 7 Lamp 전류의 변화

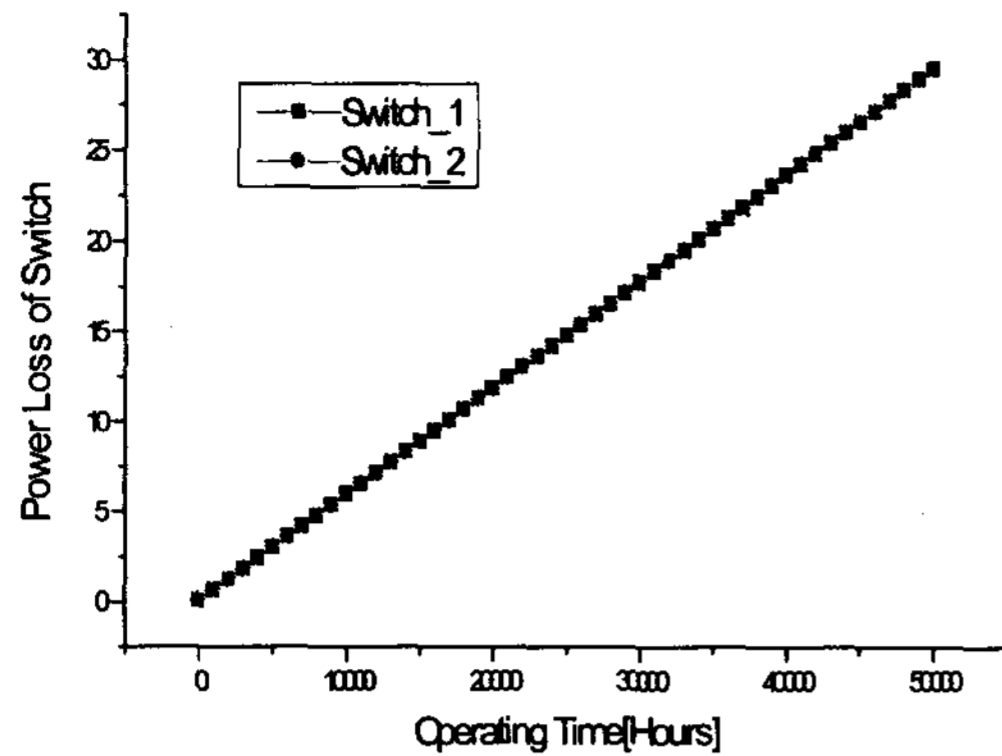


그림 8 스위칭 소자 Q의 전력 손실 변화

5. 결론

본 연구에서는 FL032/T8 형광등 1등용 전자식 안정기 가운데 타려식에 대한 신뢰성 예측 모델을 일부 중요한 소자들을 중심으로 모형화하였다. 여기서의 모형은 복잡한 구조와 종속적 특성을 소유하는 소자들을 모두 고려하지 않고 간략화 하였으며, 전체 안정기 신뢰성 예측에 적절히 이용할 수 있다. 동시에 시뮬레이션을 통하여 소자들의 전기적 특성들을 동적(dynamic)으로 고찰할 수 있는 장점이 있으며 안정기 신뢰성 분석의 중요한 기반을 제공한다. 동시에 본 연구에서의 접근 방법은 저출력용 형광등 안정기 뿐 아니라 다른 여러 고출력용 안정기에의 적용을 위한 좋은 기반으로서의 역할을 한다. 본 연구의 확장으로 소자별 보다 현실적인 차원의 특성으로 고려함이 좋은 연구 방향이다. 특히, 인덕터는 전자식 안정기에서 LCC 공진 특성을 결정하는 캐패시터와 함께 가장 중요한 소자중의 하나이다. 인덕터는 동작 시간에 따라 특성이 변하며 인덕턴스의 변화로 나타나고 이로인한 공진 회로의 출력특성의 변화 및 램프의 전압, 전류 상승 및 램프의 파손이 초래된다.

참고문헌

- [1] Ichirou Terayama, The Life of Ballast, *J. Illum. Enging. Inst. Jpn*, vol. 85, no. 9, pp. 757-759, 9, 2001.
- [2] 박태근, 이영주, 정희석, 김정수, 김진선, 천석희, 고압방전램프용 안정기의 신뢰도 모형과 분석, 2005 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회, 2005년 5월 13일~14일, 충북대학교, pp. 669-673

- [3] 전태보, *Telcordia*를 이용한 형광등용 전자식 안정기의 신뢰성 모형 수립, 2006 한국품질경영학회. 춘계학술대회, 인하대학교, pp. 69-75,
- [4] *Capacitors Data Book*, 1001 Rev. 6, Cornell Dubilier.
- [5] Sun, M. and Bryce, L. PSpice High-frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model, *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 13, no. 2, March 1998, pp. 261-271.
- [6] *Power MOSFET Data Book*, Version 5, November, 2005, STMicroelectronics.