

페라이트를 이용한 솔레노이드 코일의 임피던스 특성

*김광수, 이영환, 최용성, 박대희
원광대학교 전기전자 및 정보공학부

Impedance Properties for Solenoid Coil with a Cylindrical Ferrite Core

*Kwang-Soo Kim, Young-Hwan Lee, Yong-Sung Choi, and Dae-Hee Park
School of Electrical Electronic and Information Engineering, Wonkwang University

Abstract - 유도결합형 플라즈마를 이용하는 무전극 형광램프는 소프트 페라이트를 이용하여 방전을 유도하며, 페라이트의 주파수나 온도 특성이 안정하면, 공심 솔레노이드코일을 사용하였을 때보다 램프전력이 더 효율적이 된다. 페라이트의 형상과 코일의 권선수는 코일의 임피던스, 인덕턴스, Q-factor에 직접적으로 영향을 주며, 감은 위치에 변화에 의해서도 그 값들이 변할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 전구형 무전극 형광램프의 방전에 중요한 역할을 하는 안테나에 대한 실험 결과로서 Mn-Zn 페라이트를 이용한 솔레노이드 코일에 주파수와 코일의 권선수를 변화시켜 코일의 전기적 특성을 조사하였다. 임피던스 특성은 주파수가 증가함에 따라 증가하였으며, 코일의 권선수가 14회일 때, 기존 램프의 안테나와 비슷한 324[Ω]을 나타내었으나, Q-factor는 코일의 권선수가 증가할 수록 감소하였으며, 기존 램프의 안테나와 많은 차이를 보였다.

실험 결과로서 Mn-Zn 페라이트를 이용한 솔레노이드 코일에 주파수와 코일의 권선수를 변화시켜 코일의 전기적 특성을 조사하였다. 임피던스 특성은 주파수가 증가함에 따라 증가하였으며, 코일의 권선수가 14회일 때, 기존 램프의 안테나와 비슷한 324[Ω]을 나타내었으나, Q-factor는 코일의 권선수가 증가할 수록 감소하였으며, 기존 램프의 안테나와 많은 차이를 보였다.

또한, 기존의 QL-85W의 안테나의 주파수에 대한 임피던스[Z], 인덕턴스[L], Q-factor를 살펴본 후 이와 유사한 페라이트 코어를 사용하여 코일을 같은 방법으로 권선수와 동작주파수를 변화시켜 안테나의 전기적 특성을 비교하였으며, 차후 보다 향상된 특성의 페라이트 및 임피던스 특성에 대해 논할 계획이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 유도결합형 플라즈마의 등가회로

그림 1은 유도결합형 플라즈마의 등가회로를 나타낸다. 무전극 형광 램프의 점등회로는 유도결합형 플라즈마의 원리와 같으므로, 변압기 원리를 적용하면 유도코일에 RF 고전압을 인가하는 1차측과 방전관인 2차측으로 등가회로로 나타낼 수 있다. 1차측에서 코일의 저항성분과 인덕턴스는 각각 R_0 와 L_0 이고, 2차측에서는 유도결합 플라즈마 저항과 공심 코일의 인덕턴스는 R_p , L_p 로 표현할 수 있다[4-6]. 무전극 램프의 인버터에서 RF 전원이 코일에 인가될 때, 방전 개시전까지는 방전관이 무부하로 취급되며, 점등후는 등가적으로 순수한 저항으로 볼 수 있다.

1. 서 론

최근 고도의 경제성장과 함께 삶의 질이 향상되면서 에너지 효율이 좋고, 양질의 빛을 내는 새로운 광원기술들이 계속해서 발전하고 있다. 또한, 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 부각되면서 친 환경의 요구와 신뢰성을 갖춘 고효율 램프들이 선보이고 있다[1-3]. 이러한 추세에 따라 장수명, 고효율의 특징을 갖는 무전극 램프에 대한 관심이 증가하고 있고, 많은 연구가 진행되고 있다.

유도 결합형 플라즈마는 고주파 발생원과 플라즈마가 안테나 코일을 통해 전자적으로 결합하여 발생한다. 즉, 유도 회로에 고주파 전류를 흐르게 하면, 이 전류에 의해 발생하는 자기장이 플라즈마 발생 영역에 침입하고 패러데이의 법칙에 의해 전기장이 발생하고, 이 전기장에 의해 자유 전자가 가속되어 플라즈마가 발생하게 된다. 그리고, 유도 결합형 플라즈마는 (Inductively coupled plasma, ICP)로서 수[mTorr]의 낮은 기체 압력에서도 높은 밀도의 플라즈마를 얻을 수 있기 특징을 가지고 있어 무전극 램프에 많이 적용되고 있다.

공심 솔레노이드 코일과 다르게 페라이트를 사용했을 때 자속의 분포는 페라이트와 감긴 코일의 비율에 의존을 한다[1]. 따라서, 본 논문에서는 안테나 설계에 있어서 중요한 코일의 권선수와 길이를 고려하여 안테나의 전기적 특성에 대해 살펴보았다. 그리고, 전구형 무전극 형광램프의 방전에 중요한 역할을 하는 안테나에 대한

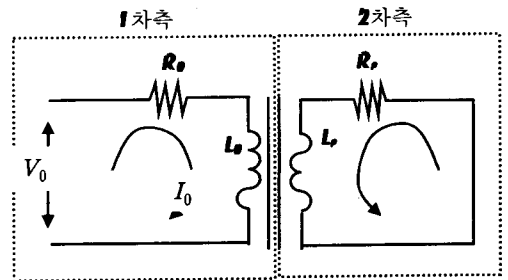


그림 1. 유도결합형 플라즈마의 등가회로
Fig. 1. Equivalent Circuit of Inductively Coupled Discharge

식 (1)은 램프가 방전되었을 때, 즉 부하가 걸렸을 때의 1차측의 임피던스를 수식으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 [Z] &= R_1 + jX_1 \\
 &= Ru + k^2 wLuQa / (1 + Q_a^2) \\
 &\quad + j[wLu - k^2 wLuQa^2 / (1 + Q_a^2)] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, ω 는 각주파수이고, k 는 코일과 플라즈마 사이의 결합계수이며, Q_a 는 플라즈마 영역에서의 Q값을 나타낸다. 부하상태의 저항은 크게 두 가지 영역으로 나눌 수 있다. 즉, 코일과 자기손실을 포함하는 1차측인 안테나의 고유저항 부분과 2차측인 플라즈마 영역이 1차측으로 환산된 저항으로 나타낼 수 있다. 램프가 방전되었을 때 등가회로에서 플라즈마 영역에서의 리액턴스는 감소를 한다. 즉, 등가 임피던스는 RF를 이용하므로 플라즈마 Q_a 에 의해 의존하며, 플라즈마 저항에 의해서만 좌우 되지는 않는다.

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_a / (1 + Q_a^2)}{1 + k^2 Q_1 Q_a / (1 + Q_a^2)} \quad (2)$$

$$(Q_1 = wL_1 / R_1)$$

식 (2)는 결합효율을 나타내고 있다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 결합효율을 증가시키기 위해서 램프의 형상 및 코일의 설계단계에서 결정되는 결합계수 k 를 증가시켜야 한다. 그리고, 방전 전 상태에서의 Q-factor 인 Q_1 의 값을 증가시켜야 한다. 주어진 주파수와 인덕턴스에서 Q_1 값을 증가시키기 위해서는 Coil의 자체 저항값을 줄이는 방법이 무엇보다 중요하며, 또한 코일과 플라즈마 사이의 결합계수와 EMI 규정을 고려하여 최적의 동작주파수를 결정해야한다[7].

2.2 시료 및 실험 방법

안테나의 전기적 특성을 위해 사용한 장비는 임피던스 아날라이저 (HP 4194A)이다. QL-85W 전구형 무전극 형광램프의 안테나 (QL-85Antena)의 특성을 살펴본 후, QL lamp와 유사한 페라이트를 선정하여 직접 안테나를 구성하여 (K-Antenna) 주파수 변화와 코일의 권선수 변화에 대한 코일의 전기적 특성을 확인하였다.

그림 2는 실험을 사용한 페라이트와 코일로서, 페라이트 코어 위에 솔레노이드 코일이 감겨있는 형상을 RZ축의 2차원 단면으로 나타내었다. 25[mm] 길이의 페라이트 2개를 맞물린 후, 그 위에 열적 특성이 좋은 테트론 테이프 0.2[mm] 감은 후, 다시 테트론 전선을 보조코일과 나란히 감은 형상이다.

실험에 있어서 방전관인 램프 별브는 제거한 후, 진행하였으며, 직접 제작한 열전도 파이프를 적용한 후 표 1에서와 같이 권선수와 주파수를 변화시켜, 주위온도 25 []에서 측정하였다. 코일의 권선수를 변화하는데 있어서, QL-85W의 Parasitic 코일과 같이 보조코일을 사용하였으며, K-Antenna에 사용한 코일의 두께가 QL-Antenna에 비해 두꺼운 것을 사용하여 17회까지 측정을 하였으며, 각각의 안테나의 형상에 대해서는 표 2에 정리하여 나타내었다.

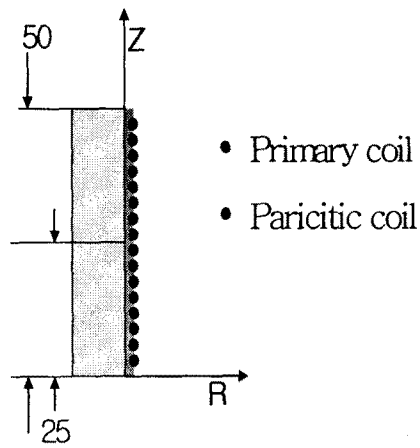


그림 2. 페라이트와 솔레노이드 코일의 형상
Fig 2. Ferrite and Solenoid coil

표 1. 실험 조건

| 실험조건 | 주파수 범위 | Turn수 변화 | 보조 코일 | 측정 온도 |
|---------------|----------------------|----------|--------|--------|
| QL-85W Antena | 500[kHz] ~ 6[MHz] | 14회 | 14회 | 25[°C] |
| K Antena | 650[kHz] ~ 8.65[MHz] | 9 ~ 17회 | 턴수와 같이 | 25[°C] |

표 2. QL-lamp와 K-lamp의 안테나 형상

| | QL-85W Antena [mm] | K Antenna [mm] |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|
| Coil 두께 | 0.25(도체) 0.72(외경) | 0.75(도체) 1.2(외경) |
| Coil 감은방향 | 오른쪽 | 오른쪽 |
| 보조코일 | 사용 | 사용 |
| 페라이트-코일간격 | 0.7(Sleeve) | 0.5(절연테이프) |
| Turn수 | 14 | 14 |
| 페라이트 | 외경 : 12 내경 : 8.25 길이 : 50 | 외경 : 18.4 내경 : 11 길이 : 50 |

3. 결과 및 검토

3.1 QL 램프의 전기적 특성

QL-85W 램프는 Fitting Based Induction lamp로서, 램프 내부에 위치하는 안테나의 구조는 그림 3(a)와 같다.

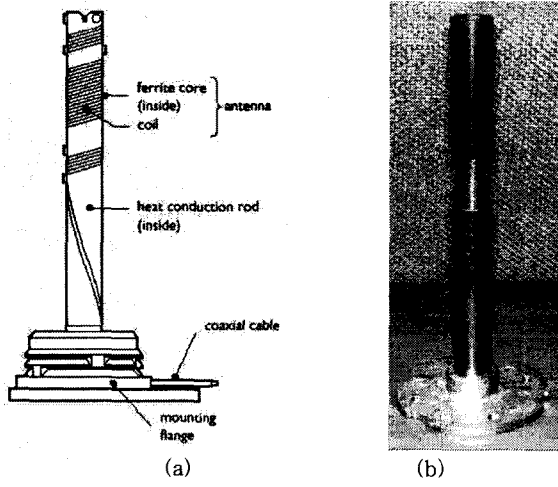


그림 3. QL-85W 램프 안테나 형상
(a)과 열전도 파이프
(b) 및 코일 형상 (c)

Fig. 3. Configuration of QL-85W Lamp Antenna, Heat pipe and Coils

QL-85W 램프의 경우 코일을 페라이트위에 직접 감지 않고, 내열성이 얇은 (0.7[mm]) Sleeve를 이용하여 내부에 페라이트를 수용하고 그 위에 코일을 감았으며, 페라이트가 위치한 곳에서 집중적으로 많이 감겨있고 (14회), 위 아래가 공심코일로서 3-4회 정도 감겨있는 형상을 하고 있다. 그림 3 (b)는 코일 및 페라이트가 위치하는 램프 내부의 열을 외부로 전달하여 램프가 방전하는데 적절한 온도범위를 유지하도록 설계된 열전도 파이프이다. 또한, 그림 3 (a)에서는 나타나진 않았지만 그림 3 (c)에서와 같이 주전원선과 같은 방향으로 감긴 보조코일 (Parasitic Coil)에서는 위상이 반대방향인 기전력이 유도되는 원리를 이용하여 외부로 방사하는 불필요한 전자계를 억제하였으며 각각의 Part는 디자인과 구조적인 측면에서 EMI를 최소화하기 위하여 독특하게 설계되었다[8-9].

그림 4는 QL-85W 안테나의 주파수와 임피던스 그리고 인덕턴스 특성을 나타내고 있다. 동작 주파수인 2.65[MHz]에서의 임피던스와 인덕턴스는 각각 318.7[Ω], 19.13[μH]이고, 전체적으로 4[MHz]까지는 주파수에 대하여 안정된 특성을 보였다. 특히, 2-4[MHz] 범위에서 인덕턴스의 변화는 16-22.3[μH]를 나타내었다.

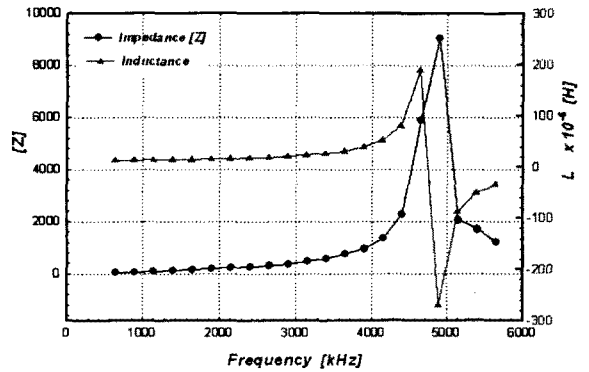


그림 4. 주파수에 대한 코일의 저항[R], 리액턴스[X] (QL-85W 안테나)
Fig. 4. Resistance[R], Reactance[X] Properties of as a function of Frequency. (QL-85W Antenna)

QL-85W 안테나의 주파수에 대해서 (500[kHz]-6[MHz]) 코일의 저항과 리액턴스의 변화를 그림 5에 나타내었다. 약 4.8[MHz]의 주파수에서 약 4000[Ω] 정도의 높은 저항과 리액턴스를 보였으며, QL-lamp가 구동되는 주파수인 2.65[MHz] 전후로는 주파수에 대해서 비교적 안정된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 2.65[MHz]에서의 저항과 리액턴스는 각각 4.3[Ω] 및 318[Ω]을 나타내었다.

3.2 k-Core 코일의 전기적 특성

K-type Antenna의 주파수 및 Q-factor와의 관계를 그림 6에 나타내었다. K-type Antenna의 경우, 1[MHz] 내외에서 가장 큰 Q-factor를 가졌으며, 4[MHz]까지 주파수의 증가에 따라 급격히 감소하는 특성을 보였다.

권선수와 Q-factor와의 관계는 코일의 권선수가 증가할수록 그래프가 낮은 주파수 쪽으로 이동하며, 2.65[MHz]를 기준으로 할 경우, 코일의 권선수가 9회 일때 59.72로 가장 높은 값을 보였고, 권선수가 증가함에 따라 Q-factor가 3씩 감소하는 경향을 보였으며 17회일때는 33.24를 나타냈다.

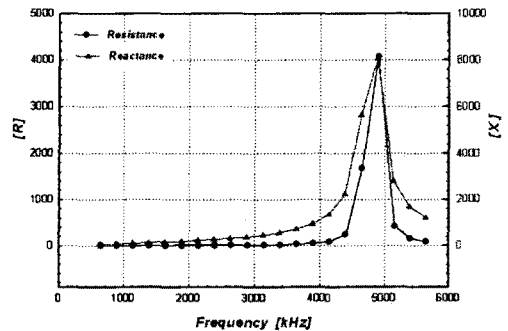


그림 5. QL-85W안테나의 주파수에 대한 코일의 저항 [R] 및 리액턴스[X]
Fig. 5. Resistance[R], Reactance[X] Properties of QL-85W Antenna as a function of Frequency.

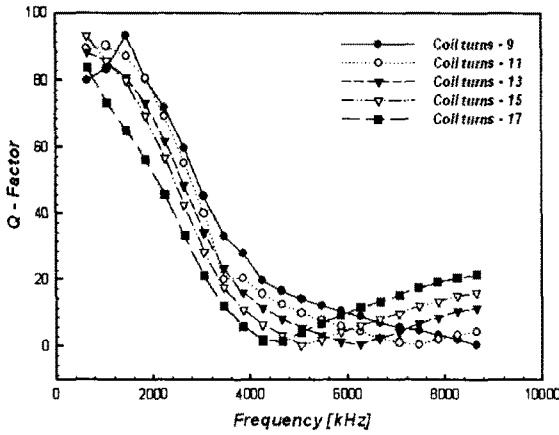


그림 6. 코일 권선수에 대한 주파수와 Q-Factor
Fig. 6. Frequency VS. Q-Factor as a function of each coil turns

그림 7은 각각의 코일 권선수에 대하여 주파수 변화에 대한 인덕턴스의 변화를 나타내고 있다. 그림 7에서 코일의 권선수가 증가할수록, 인덕턴스는 증가하고 있다. 2.65[MHz]의 주파수를 기준으로 할 경우, 9.13-29.17[μH]까지 변화하였다. 또한, 공진주파수는 코일의 권선수가 증가할수록, 감소하고 있다.

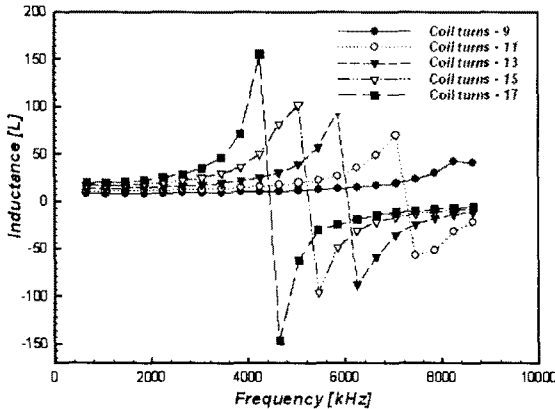


그림 7. 코일 권선수에 대한 주파수와 인덕턴스[L]
Fig. 7. Frequency VS. Inductance[L] as a function of each coil turns

코일 권선수 변화에 대한 인덕턴스와 Q-factor를 그림 8에서 나타내었다. 코일 권선수가 증가함에 따라 인덕턴스는 선형적으로 증가하였고, 이에 대하여 Q-factor는 점점 감소하는 경향을 보였다. 이러한 추이로 볼 때, QL-85W의 Q-factor 값이 약 70인 것을 감안하면 K-type 안테나 코일의 턴수가 5-6일 때 상응하는 값을 가질 것으로 예측된다.

무전극 방전에서 안테나의 Q-factor는 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중 하나이므로 성능 향상을 위한 연구·개발에 대한 노력이 계속되어야 할 것으로 생각된다.

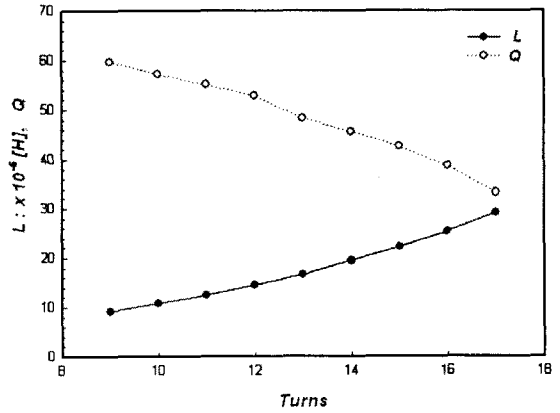


그림 8. 코일턴수에 대한 주파수와 인덕턴스[L]
Fig. 8. Frequency VS. Inductance[L] as a function of each coil turns

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 안테나와 k-type 안테나의 주파수 증가에 대한 전기적인 특성을 확인하였다. 코일에 전류를 흘리기 시작하면, 페라이트 코어가 포화되고, 솔레노이드 코일은 공심 코일로서 역할을 하게 되어 급격하게 자계가 감소하게 된다. 본 논문에서는 주파수와 코일의 권선수 변화에 대한 임피던스, 인덕턴스, 리액턴스 및 Q-factor를 중점으로 조사하고 기존 램프의 전기적 특성과 비교·분석하였다.

1. 기존 램프의 경우 (QL-85W Antenna) 동작 주파수 범위에서 안정된 인덕턴스, 임피던스 그리고 약 70 정도의 Q-factor를 가졌다.
2. 임피던스의 경우, 동작주파수가 2.65[MHz]이고 권선수가 14회일 때, QL-85 Antenna는 319[Ω]이고, K-Antenna는 324[Ω]로 비슷한 값을 나타내었다. 권선수가 증가함에 따라 임피던스는 증가하며, 권선수가 17회 일 때, 486[Ω]까지 나타났다.
3. 인덕턴스의 경우, 동작주파수가 2.65[MHz]이고 권선수가 14회일 때, QL-85 Antenna는 19.12[μH]이고, K-Antenna는 19.45[μH]로 비슷한 값을 나타내었다. 권선수가 증가함에 따라 인덕턴스는 증가하며, 권선수가 17회 일 때, 29.17[μH]까지 나타났다.
4. 코일의 저항 성분은 동작주파수가 2.65[MHz]이고 권선수가 14회일 때, QL-85 Antenna는 4.39[Ω]이고, K-Antenna는 7.09[Ω]로 비교적 높은 값을 나타내었다. 권선수가 감소함에 따라 저항은 감소하여, 권선수가 11회 일 때, 3.79[Ω]을 나타냈다.
5. 안테나 설계에 있어서 코일의 전기적 성능을 향상시키는 최적의 조건을 구하기 위하여, 코일의 저항성분이 작은 것이 요구되며, Q-factor를 증가시키기 위하여 권선수의 감소가 요구되지만, 인덕턴스가 감소되므로 적정의 권선수가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 에너지 관리 공단에서 시행한 “고효율 무전극 형광등 광원 기술개발-전구형”사업의 지원을 받아 수행 되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] E. C. Snelling, "Soft Ferrites Properties and Applications", Butterworth & Co. Ltd, 1988
- [2] Brian cook, "New developments and future trends in high-efficiency lighting", Engineering Science and Education Journal, Vol. 9, pp. 207-217, 2000.
- [3] V.A Godyak, K. Ohata, et al., "Radio Frequency Light Sources", Industry Applications Conference, Conference Record of the 2002 IEEE, Vol.5, pp.3281-3288, 2000.
- [4] R. B. Piejak, V. A. Godyak, B M Alexandrovich, "A simple analysis of an inductive RF discharge" Plasma Sources Science Technology, Vol.1, pp.179-186, 1992.
- [5] J. T. Gudmundsson, M. A. Lieberman, "Magnetic induction and plasma impedance in a cylindrical inductive discharge", Plasma Sources Science Technology, Vol.6, pp.540-550, 1997.
- [6] V. A. Godyak, R. B. Piejak, B. M. Alexandrovich, "Electrical characteristics and electron heating mechanism of an inductively coupled argon discharge" Plasma Sources Science Technology, Vol.3, p.169, 1993.
- [7] Chandra, H., "Mitigation of electromagnetic interference in low power compact electrodeless lamps", Industry Applications Conference, 31th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1996 IEEE, Vol.4, pp.2194-2200, 1996.
- [8] J.R.Coaton and A. M. Marsden "Lamps and Lighting" chapter 11, pp216-226. 1996.
- [9] Jing and Yinzha0 Lei, "Analytical expression to impedance for solenoid coil with a coaxial cylindrical ferrite core of finite length. Journal of Physics D: Applied Physics. 35(2002) 570-575.
- [10] Ben-Yaakov, S.; Shbartsas, M.; Lester, J., "A behavioral SPICE compatible model of an electrodeless fluorescent lamp", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. 7th Annual IEEE, Vol.2. pp.948-954, 2002.