

## 다이오드 정류회로의 입·출력 특성해석

\*김응진, 한찬영, 최규하, \*\*이상민

\*건국대학교, \*\*동진전원

### Analysis of Input-Output Characteristics for Single-Phase Diode Rectifier

\*E.J. Kim, C.Y. Han, G.H. Choe, \*\*S.M. Lee

\*Konkuk Univ, \*\*Dongjin Power Source

#### ABSTRACT

In this paper, we investigate accurately the input-output characteristic of single-phase diode rectifier. The diode rectifier has some advantages of simplicity, cost, and high-efficiency. But it has some defects which THD of input current, low PF, and voltage drop of output side. In order to compensate it, we analyzed using the parameter variation and introduced capacitor insertion method for reducing the distortion and increasing the PF.

#### 1. 서론

다이오드 정류기는 구조가 간단하고 비용이 저렴한 장점을 가지므로 현재까지 AC-DC 변환장치로서 가장 널리 사용되고 있다.

그러나 다이오드 정류회로의 경우 순시전력제어를 하지 않음으로서 입력측에 큰 고조파 전류로 인한 역률저하 및 직류전압에 많은 ripple 전압을 포함하게 된다.

그러므로 다이오드 정류기의 실제 설계 및 제작에 있어서 돌입전류, 역률의 저하, 출력전압의 강하, 리플전압 등은 회로의 안정성 및 시스템의 성능이나 소자들의 파라미터 선정에 있어 많은 영향을 미치고 있으므로 그 중요성을 간과해서는 안될 것이다.

따라서, 본 논문에서는 수 kW급의 전원장치를 대상으로 주로 사용되는 단상 다이오드 정류회로의 해석을 통하여 정류회로를 구성하는 커패시턴스 및 인덕턴스 성분의 변화에 따른 역률, THD, DC전압변동 등의 정밀해석과 커패시터의 삽입을 통한 역률개선을 시뮬레이션을 통하여 검증하고 보다 효율적인 다이오드 정류회로의 설계 기준을 제시하고자 한다.<sup>[1]</sup>

#### 2. 다이오드 정류회로의 해석

##### 2.1 교류측 인덕턴스에 의한 역률의 변화

역률은 전류왜곡에 의한 고조파 성분과 위상차에 의한 성분으로 나누면 다음과 같이  $k_p$ 와  $k_d$ 로 정의할 수 있다.

$$\text{purity power factor } (k_p) = \frac{I_{s1}}{I_s} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (1)$$

$$\text{distortion power factor } (k_d) = DPF = \cos \phi_1 \quad (2)$$

다이오드 정류회로에서는 출력측에 평활용 커패시터만을 사용함으로써 다이오드가 turn-on이 되는 시간 ( $0 < \omega t < \omega t_{off}$ )이 짧아지게 됨으로 전원측 전류의 왜곡이 심해지게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 인덕터를 교류측이나 직류측에 사용함으로써 역률을 개선시키는 효과를 얻을 수 있다.

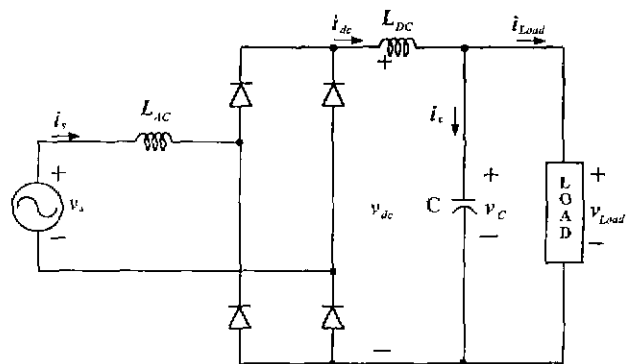
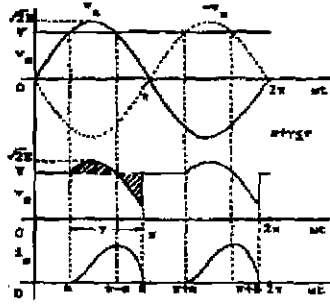


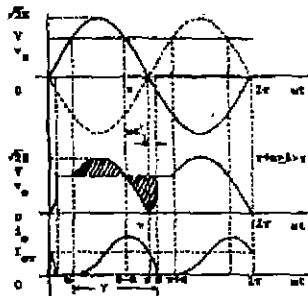
그림 1. 단상 다이오드 정류회로

이때 인덕터를 삽입하였을 경우의 해석은 일반적으로 직류측에 삽입하였을 경우를 기준으로 하게

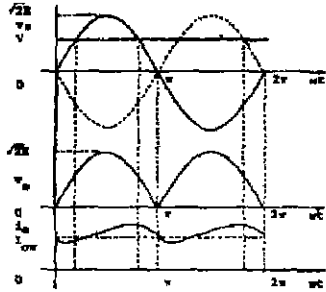
되며 부하전류의 크기에 따라 그림 2와 같이 DCM1, 2 및 CCM 모드로 동작을 하게 된다.



(a) DCM1(Discontinuous Conduction Model)



(a) DCM2 (Discontinuous Conduction Mode2)



(c) CCM(Continuous Conduction Mode)

그림 2. 인덕터를 삽입하였을 경우 모드별 전원전류

여기에서 각각의 도통상태에 따른 역률은 다음과 같다.

$$V_{base} = \sqrt{2}E \quad (3)$$

$$Z_{base} = \omega L_f \quad (4)$$

$$I_{base} = \sqrt{2}E / (\omega L_f) \quad (5)$$

- DCM1(Discontinuous Conduction Model)

$$I_{om} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} i_{on} d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi} [\gamma \cos \alpha + \sin \alpha - \sin(\alpha + \gamma) - m \gamma^2 / 2]$$

$$\alpha \leq \omega t \leq \pi \quad (6)$$

$$I_{orn} = \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} i_{on}^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \quad \alpha \leq \omega t \leq \pi \quad (7)$$

$$(PF) = V \cdot I_{on} / (E \cdot I_{orn})$$

$$= V \cdot I_{on} / (E \cdot I_{orn}) = \sqrt{2} m I_{on} / I_{orn} \quad (8)$$

- DCM2(Discontinuous Conduction Mode2)

$$I_{on} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} i_{on} d(\omega t) + \int_0^{\omega t_1'} i_{on}' d(\omega t') \right] \quad (9)$$

$$I_{orn} = \left[ \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\pi} i_{on}^2 d(\omega t) + \int_0^{\omega t_1'} i_{on}'^2 d(\omega t') \right\} \right]^{1/2} \quad (10)$$

이때의 PF는 식 8에 대입하여 구한다.

- CCM(Continuous Conduction Mode)

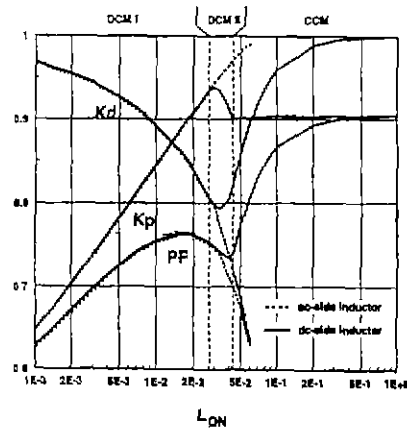
$$(PF) = \frac{VI_0}{EI_{0r}} = VI_0 / E(I_0^2 + I_{0r}^2)^{1/2}$$

$$= V / E(1 + (I_{0r}/I_0)^2)^{1/2}$$

$$= 0.9 / [1 + (0.1525/I_{on})^2]^{1/2} \quad (11)$$

이때 역율은 정류회로의 출력, 전원주파수, 공급전압 및 인덕터스에 영향을 받으므로  $L_{on}$ 을 다음과 같이 정의할 수 있으며  $L_{on}$ 의 변화에 따른 역율의 변화는 그림 27과 같다.

$$L_{on} = L_s \frac{fP_{out}}{V_{ac}^2(rms)} \quad (12)$$



$$DCM1 : L_{on} < 0.027$$

$$DCM2 : 0.027 < L_{on} < 0.043$$

$$CCM : L_{on} > 0.043$$

그림 3.  $L_{on}$ 에 따른 역율의 변화(PF :

역률, Kp : purity FP, Kd : DPF)

그림 3에서 보는바와 같이 DCM1(Discontinuous Conduction Mode)에서는 ac측이나 dc측에 인덕터를 삽입한 경우 모두 L값의 증가에 따라 역율이

증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있으며 이는 THD가 감소함으로서 Kp는 증가하지만 인덕터에 의한 지상전류의 흐름으로 Kd는 감소함에 따라 나타남을 알 수 있다. DCM2에서는 dc측에 인덕터를 삽입한 경우 인덕턴스의 전압성분에 의하여 전류모드가 바뀔에 따라 Kp와 Kd는 변화함으로서 역률이 감소하다가 증가세로 돌아선다. CCM(Continuous Conduction Mode)모드에서는 Kp는 일정한 흐름을 유지하지만 Kd는 다시 증가하게 됨으로서 역률이 다시 상승함을 알 수 있다.

ac측에 인덕터를 삽입한 경우는 DCM1만 존재하므로써 역률이 계속 감소함을 알 수 있다

그러나 CCM모드에서는 인덕턴스의 값이 너무 크게되어 직류측 전압이 심하게 감소하므로 일반적으로는 DCM1에서의 역률이 최대가 되는 지점에서 인덕터의 값을 결정하게 되면 이때 0.016에서 PF=0.76이 된다<sup>[2]</sup>.

## 2.2 커패시턴스 성분이 정류회로에 미치는 영향

다이오드 정류기의 출력단에 매우 큰 커패시터를 연결하였다고 가정하면 DC전압은 일정하다( $V_{load}$ )고 할 수 있으며 다이오드 정류회로의 동작모드는 다이오드의 ON, OFF 상태에 따라 입력전압의 절대값이 직류전압보다 큰 도통모드( $|v_s| > V_{load}$ )와 입력전압의 절대값이 직류전압보다 작은 개방모드( $|v_s| < V_{load}$ )로 나눌 수 있다.

개방모드에서 커패시터에 충전된 전압은 초기치  $v_s(t_{off})$ 로부터 RC 시정수에 따라 지수적으로 감소하기 시작한다.

그림 3은 커패시터출력단의 파형을 나타낸 것으로 다이오드가 turn-off될 때의 시간은 다이오드의 전류가 0이 되므로 식(4)와 같은 조건에서 구할 수 있으며 이 때, 커패시턴스 및 주파수와 turn-off시간과의 관계식을 얻을 수 있다.

$$i_{dc} = i_c + i_{load} = 0 \quad (13)$$

$$C \frac{dv_s(t_{off})}{dt} + \frac{v_s(t_{off})}{R} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{1}{\omega RC} = \tan(\omega t_{off}) \quad (15)$$

다이오드가 꺼진 후 다시 도통이 되는 turn-on 시간은 DC전압이 RC 시정수에 의한 지수함수적으로 감소하고 입력전압과 출력전압의 절대값이 같아지는 순간에서 구할 수 있으며 커패시턴스 값과 직류리플전압과의 관계식(10)을 구할 수 있다.

$$V_s \cos(\omega t_{off}) \exp\left[-\left(\frac{t_{on} - t_{off}}{\tau}\right)\right] = |V_s \cos(\omega t_{on})| \quad (16)$$

$$\Delta V_{dc} < V_s T / (2RC) = V_s / (2fC) \quad (17)$$

$$\Delta V_{dc} = \frac{I_{dc}}{2fC} \left( I_{dc} = \frac{V_L}{R} \right) \quad (18)$$

$$C = \frac{I_{dc}}{2f\Delta V_{dc}} \quad (19)$$

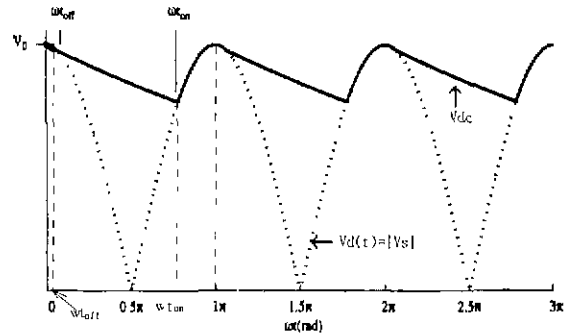
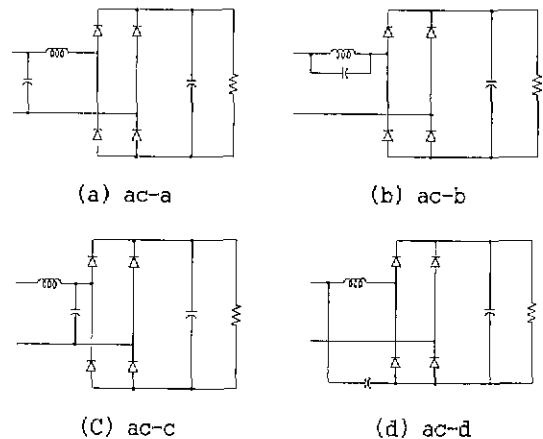


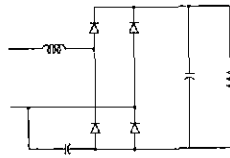
그림 3. 다이오드 정류기의 출력 전압

## 2.3 역률개선통용 커패시터

인덕턴스만을 삽입한 경우 이론적으로 역률이 0.76을 넘지 못하므로 이 이상으로 역률을 개선하기 위하여 그림 4~6과 같이 추가적인 커패시터를 삽입하게 된다. 삽입된 커패시터는 단지 진상 전류성분을 흐르게 할뿐이며 정류작용에는 영향을 미치지 않으며 그 기능은 진상전류를 흐르게 함으로서 역률을 개선하고 입력전류파형을 조절해 줌으로서 각종 국제규격을 만족할 수 있도록 한다.

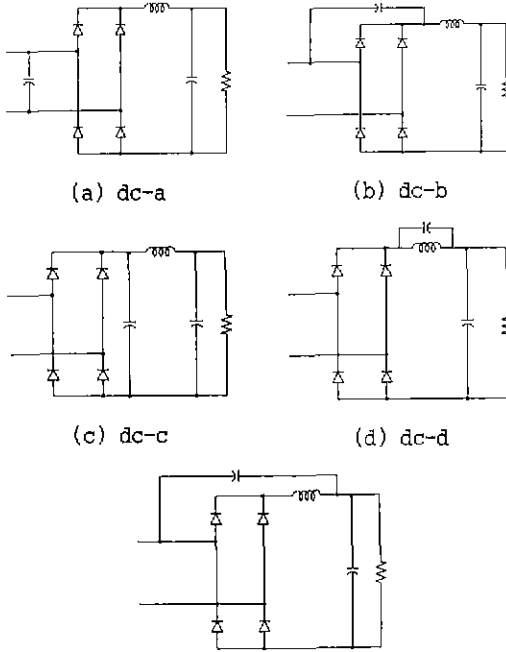
이때 그림 4의 (d) 및 (e)와 그림 5의 (b)와 (e)의 경우 커패시터의 삽입이 비대칭 형태로 되므로 작수 고조파가 발생하게 되며 결과적으로 전류의 파형이 시간축에 대하여 비대칭 파형의 형태로 나타나게 된다. 이를 방지하기 위하여 Split Capacitor를 삽입하게 되며 이는 그림 6의 형태로 바뀌어지게 된다<sup>[5]</sup>.





(e) ac-e

그림 4. 교류측 인덕턴스 사용시 커패시터 삽입법 (ac-a, b, c, d, e)



(a) dc-a

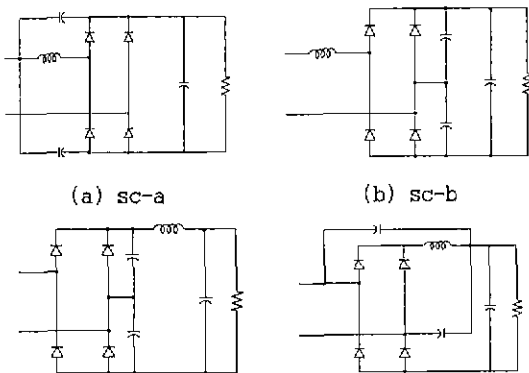
(b) dc-b

(c) dc-c

(d) dc-d

(e) dc-e

그림 5. 직류측 인덕턴스 사용시 커패시터 삽입법 (dc-a, b, c, d, e)



(a) sc-a

(b) sc-b

(c) sc-c

(d) sc-d

그림 6. split capacitor의 삽입법

### 3. 시뮬레이션 결과

다이오드 정류회로에 있어서 인덕턴스 및 커패시턴스

의 성분 변화가 다이오드 정류회로에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 DC전압리플, PF, THD, DPF 등의 변화를 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다.

본 시뮬레이션에서는 상용커패시터의 값인 1500[μF], 2700[μF], 3300[μF], 6800[μF]의 4가지 경우에 대해서 인덕턴스 값을 0에서 15[mH]까지 1[mH]씩 증가시키면서 시뮬레이션을 실행하였다.

시뮬레이션은 PSIM4.0을 이용하였으며 시뮬레이션을 위한 파라미터의 값은 표 1과 같다.

표1. 시뮬레이션 파라미터

항목	설계값
Power [W]	3000
입력전압 [V]	$220\sqrt{2}$
DC전압 [V]	311.12
DC전류 [A]	$I_o = \frac{P_D}{V_{DC}} = 9.64$
부하	$R = \frac{V_{DC}}{I_o} = 32.3$
역률 개선용 커패시터 [uF]	100

그림7~10은 인덕턴스와 커패시턴스의 변화에 따른 THD, DPF, PF, Vdc\_peak의 변화를 나타낸 것이다.

그림 7에서는 이러한 인덕턴스 성분이 증가할수록 THD가 감소함을 알 수 있다. 그러나 과도하게 큰 인덕턴스 값을 사용할 경우 전류의 왜곡은 감소하게 되나 지상전류의 유입으로 인해서 전원전압과 전류의 위상차가 증가하게 된다. 그림 8에서 인덕턴스 성분이 증가할수록 위상차가 증가하여 DPF가 감소함을 볼 수 있다. THD와 DPF의 곱으로 표현되는 PF는 그림 9에서 인덕터의 값이 증가할수록 PF가 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 THD가 감소함으로서 kp는 증가하지만 인덕터에 의한 지상전류의 유입으로 kd는 감소함에 따라 나타남을 알 수 있다.

그림 10의 직류측 출력전압은 인덕턴스 성분이 증가할수록 손실이 커져서 전압강하의 폭이 증가하므로 출력전압은 낮아짐을 볼 수 있다.

역률 개선용 커패시터의 삽입에 관한 시뮬레이션은 각각의 경우에 대하여 인덕터의 값은 4.5mH, 직류측 커패시터 값은 6800uF, 그리고 역률 개선용 커패시터 값은 100uF에 대하여 실행하였다.

표 2~4는 각각에 대한 PF, THD, DPF를 나타내고 있으며 그림 11~13은 전원 전류의 파형을 나타낸 것이다.

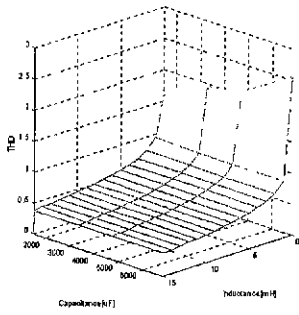


그림 7. THD의 변화

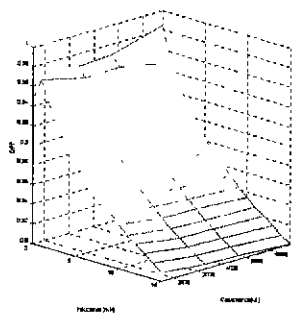


그림 8. DPF의 변화

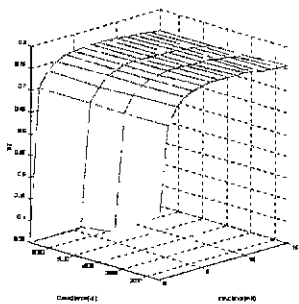


그림 9. PF의 변화

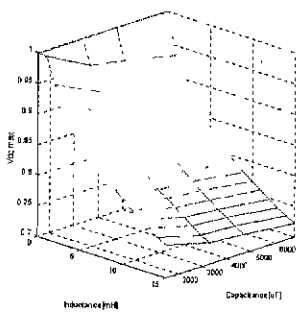
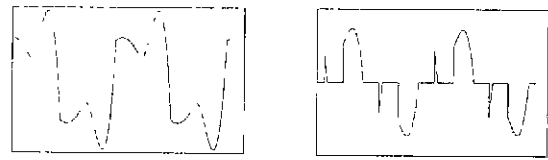
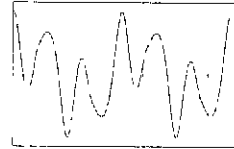


그림 10. Vdc\_peak의 변화

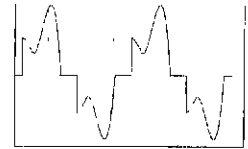


(a) ac-a

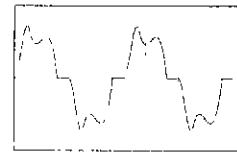
(b) ac-b



(c) ac-c



(d) ac-d

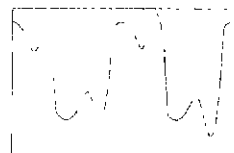


(e) ac-e

그림 11. 교류측 인덕턴스 사용시 커패시터삽입 위치에 따른 전원전류의 파형

표 2. 그림 12에 대한 결과 : PF, THD, DPF

	PF[%]	THD[%]	DPF[%]
ac-a	79	63.3	94
ac-b	77.7	73.5	96
ac-c	54	119	84.5
ac-d	91.1	43.3	99.58
ac-e	93	27.2	96.4



(a) dc-a

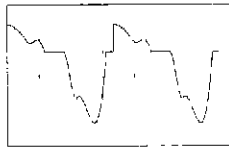
(b) dc-b



(c) dc-c



(d) dc-d

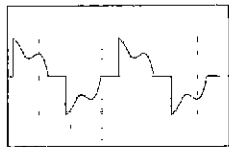


(e) dc-e

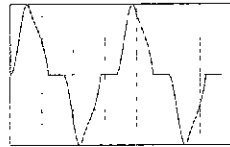
그림 12. 직류측 인덕턴스 사용시 커패시터삽입 위치에 따른 전원전류의 파형

표 3. 그림 12에 대한 결과 : PF, THD, DPF

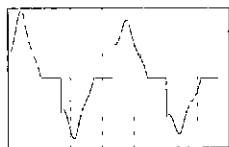
	PF[%]	THD[%]	DPF[%]
dc-a	79	63.3	94
dc-b	80.7	69.9	99.4
dc-c	89.7	49.5	99.9
dc-d	90	49.5	99.9
dc-e	79.8	73.8	99.4



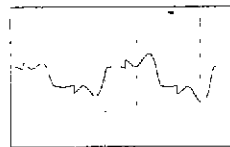
(a) sc-a



(b) sc-b



(c) sc-c



(d) sc-d

그림 13. Split 커패시터삽입 방법에 위치 전원전류의 파형

표 4. 그림 13에 대한 결과 : PF, THD, DPF

	PF[%]	THD[%]	DPF[%]
sc-a	85	45	93.8
sc-b	84	40.6	90.8
sc-c	80.2	43.3	87.3
sc-d	88	51.6	99

#### 4. 결론

본 논문에서는 단상 다이오드 정류회로에 제하여 인덕턴스 값에 대한 역률의 변화와 커패시터 값에 대한 출력 리플전압 및 역률개선용 커패시터에 대하여 고찰하였으며 시뮬레이션을 통하여 인덕턴스와 커패시터 성분은 역률, 출력전압강하 및 리플전압등에 미치는 영향을 알아보았다. 그리고 역률개선용 커패시터를 사용하여 THD, DPF, PF의 개선을 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.

이를 통해 다이오드 정류기의 설계시 여러 특성에 대해 비교하여 최적설계를 위한 기준을 제시하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons. Inc. Second Edition, pp. 77-121, 1995.
- [2] Shashi B. Dewan, "Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply", IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-17, No. 3 pp.282-288, May/June, 1981.
- [3] Philip T. Krein, "Elements of Power Electronics", Oxford Univ. Press. Inc., pp.163-205, 1998.
- [4] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice-Hall. Inc, pp. 59-161, 1997
- [5] R. Redl, L. Balogh, "Power-Factor Correction in Bridge and Voltage-Doubler Rectifier Circuits with Inductors and Capacitors", Proceedings of APEC pp. 466-472, 1995.