

PFC 스위칭 정류기에서 손실인자에 의한 내부손실과 효율분석에 관한 연구

안태영^{*†}

^{*†} 청주대학교 전기제어공학과

A Study on the Internal Loss and Efficiency Analysis by Loss Factors in PFC Switching Rectifier

Tae Young Ahn^{*†}

^{*†} Department of Electrical & Control Engineering, Cheongju University

ABSTRACT

In this paper, we propose a theoretical method to systematically analyze the power conversion efficiency of a single-phase PFC switching rectifier. Boost-type PFC was organized in order of highest correlation with load current using steady-state analysis results and introduced the concept of loss factor. The loss factors for each major element are summarized and presented in a table. This paper makes it easier to understand the internal loss and power conversion efficiency of the rectifier for loss factors. Lastly, to confirm the validity of the efficiency analysis results reflecting the loss factors, loss and efficiency analysis of the 2.5kW PFC rectifier was performed. The results were compared with data from a 2.5kW PFC circuit for evaluation. As a result, the usefulness of power conversion efficiency analysis reflecting the loss factors proposed in this paper was confirmed.

Key Words : PFC, Switching rectifier, Efficiency analysis, Internal loss, Loss factor, Boost converter

1. 서 론

현대 사회에서 데이터센터, 통신기 중계기 등과 같은 대용량 전력 사용 장치는 다양한 산업과 인프라의 핵심 요소로 자리잡고 있다. 이러한 장치들은 방대한 양의 전력을 소모하며, 이에 따라 전력 효율성은 운영 비용과 환경 영향을 최소화하는 데 있어 중요한 요소로 작용한다. 전원장치의 효율성 향상은 단순히 전력 소비를 줄이는 것을 넘어서 이산화탄소 배출 저감, 유지보수 비용 절감, 그리고 전체 운영 비용 절감에 중대한 영향을 미친다. 대용량 전력 사용 장치는 전력 소비량이 매우 크기 때문에, 전원장치의 효율성을 높이는 것은 에너지 절약과 직결된다. 고효율 전원장치는 더 적은 전력을 소모하여 동

일한 성능을 발휘하므로, 에너지 소비를 크게 줄일 수 있다. 이는 곧 화석 연료 사용 감소로 이어지며, 결과적으로 이산화탄소 배출을 줄이는 효과를 가져온다. 따라서 효율적인 전원장치의 도입은 지구 온난화 방지와 같은 환경 보호 측면에서 중요한 역할을 한다.

특히 교류를 사용한 경우 AC/DC 스위칭 정류기의 초기 설계 단계에서 효율 분석이 필요하다는 점을 강조할 필요가 있다. 스위칭 정류기는 대용량 전력 사용 장치의 전원 공급 시스템에서 핵심적인 역할을 하며, 그 효율은 전체 시스템의 전력 변환 효율에 직접적인 영향을 미친다. 스위칭 정류기는 고주파 스위칭을 통해 전력 변환 효율을 높이고, 이를 통해 내부 열 발생을 줄이며, 전력 손실을 최소화한다. 따라서 스위칭 정류기의 효율 분석은 대용량 전력 사용 장치의 운영 비용을 줄이고 환경적 영향을 최소화하는 데 필수적이다. 기존 효율 분석 방법은

[†]E-mail: tyahn@cju.ac.kr

최대전력과 같이 특정 부하 조건에서 주요 소자의 전력 손실과 비율을 표현하였다. 이러한 방법은 연속된 부하 조건에서 효율 개선을 목적으로 이용하기 어려운 단점이 있으며, 특히 특정 소자의 손실이 연속부하 조건에서 효율에 얼마나 기여하는지 알 수 없었다[1-3].

본 논문에서는 단상 PFC(power factor correction) 스위칭 정류기의 전력변환 효율분석을 앞에서 언급한 문제를 해결하기 위해서 체계적으로 수행하기 위한 이론적인 방법을 제안하였다. 부스트형 PFC는 정상상태 해석 결과를 이용하여 부하전력 및 부하전류와 관련성이 높은 순서대로 정리하여 손실인자(loss factor) 개념을 도입하였고, 각 주요 소자에 대한 손실인자를 정리하여 나타내었다. 특히 본 논문에서는 손실인자에 대한 정류기의 내부손실과 전력변환 효율에 대한 기여도를 그래프 등으로 나타내어 직관적으로 이해할 수 있도록 하였다. 끝으로 손실인자를 반영한 효율분석 결과에 대한 유효성을 확인하기 위해서 2.5kW급 PFC 정류기에 대한 손실과 효율 분석을 수행하고 그 결과를 평가용 2.5kW급 PFC 회로의 데이터와 비교하였다.

2. PFC 스위칭 정류기의 정상상태 특성

Fig. 1에는 단상 PFC 스위칭 정류기의 기본회로를 보여주고 있다[4-6]. 그림에서 입력전압 v_{in} , 전파정류를 위한 브릿지 다이오드 D_{1-4} , 주스위치 S 와 부스트 인덕터 L , 스위칭 다이오드 D , 출력 커패시터 C , 부하저항을 갖고 있다. Fig. 2에는 정상상태에서 동작하는 경우 단상 PFC 회로의 입력과 출력파형을 교류입력 주파수의 한 주기로 나타내었다. 위로부터 출력전압 v_o , 입력의 순시전압과 전류 v_{in} , i_{in} , 인덕터 전류 i_L 파형이다. 스위치의 동작 시비율 d_s 과 스위치 다이오드의 동작시비율 d_D 을 나타내었다. 식 (1)은 부스트 컨버터의 입력력 전압 이득을 나타낸 것이며, 입력전압에 대한 시비율 변화는 식 (2)와 같다. 입력전압이 정현파인 경우 식 (3)으로 표현되고 Fig. 2에서 스위치 시비율 파형과 일치한다. 이때 출력전압 V_o 은 정상상태에서 일정하다고 가정한다.

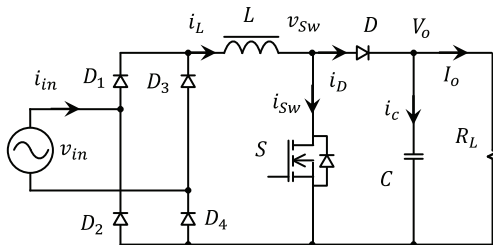


Fig. 1. Basic circuit of boost type PFC switching rectifier.

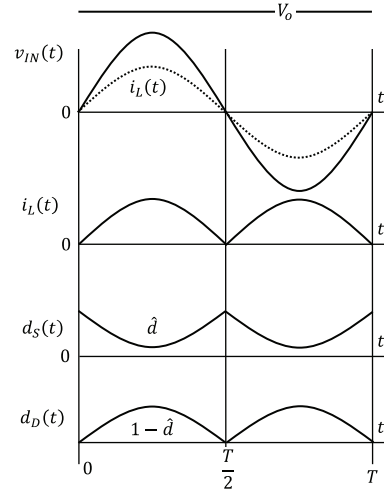


Fig. 2. Main operating waveforms in steady state.

$$\frac{V_o}{v_{in}} = \frac{1}{1-d} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{v_{in}}{V_o} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{V_m}{V_o} \sin \omega t \quad (3)$$

다음으로 스위칭 주기에 대한 미시적 관점에서 동작을 관찰하기 위해서 Fig. 3과 같은 전류연속 모드에서 동작하는 경우 정상상태 동작파형을 나타내었다. 특히 각 소자의 전류는 각 소자의 전압 전류 파형으로부터 주요 소자 전류의 실효값과 평균값, 피크값을 식 (4-10)와 같이 구할 수 있다[7, 8]. 이때 입력전압 V_{in} 은 실효값이다. 특히 인덕터의 자속밀도 변화량 ΔB 은 식 (7)과 같다. 식에서 알 수 있듯이 모든 전류와 자속밀도 식에는 출력전력 P_o 항이 포함되어 있으며, 비례 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 즉 출력전력에 대해 1차함수인 선형적으로 증가한다는 것을 의미한다.

$$I_{in,av} = \frac{2}{\pi} \frac{\sqrt{2} P_o}{V_{in}} \quad (4)$$

$$I_{L,rms} = \frac{P_o}{V_{in}} \quad (5)$$

$$I_{L,pk} = \frac{2\sqrt{2}}{V_{in}} \cdot P_o \quad (6)$$

$$\Delta B = \frac{L}{A_e N} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{V_{in}} \cdot P_o \quad (7)$$

$$I_{sw_rms} = \frac{P_o}{V_{in}} \cdot \sqrt{1 - \frac{8\sqrt{2} V_{in}}{3\pi V_o}} \quad (8)$$

$$I_{D_av} = \frac{P_o}{V_o} \quad (9)$$

$$I_{co_rms} = \frac{P_o}{V_o} \sqrt{\frac{8\sqrt{2} \cdot V_o}{3\pi \cdot V_{in}} - 1} \quad (10)$$

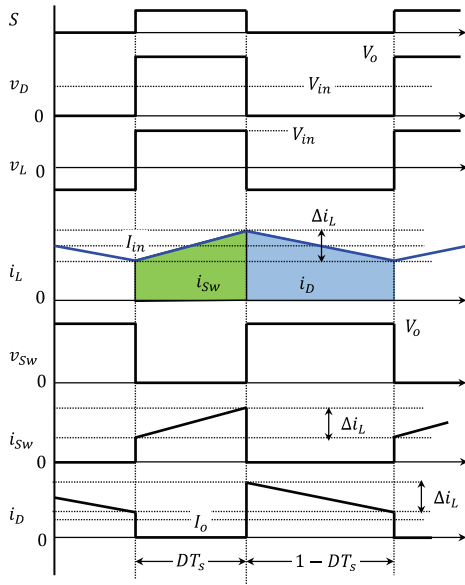


Fig. 3. Operation waveforms in steady state.

3. 정상상태에서 손실 인자

Fig. 4에는 내부 손실 저항이 반영된 단상 PFC스위칭 정류기의 등가회로이다. 그림에서 각 주요 소자와 직렬로 표현된 저항은 내부 기생저항을 나타낸 것이며, 이러한 저항은 소자의 전류에 의해 전도손실이 발생한다. 소자의 손실을 발생하는 요인은 전도손실 뿐만 아니라 브릿지 다이오드를 포함한 다이오드 순전압강하 V_{F_bg} , V_{F_D} 에 의한 손실과 스위치의 등가 커패시터 Q_{sw} , Q_D 등에 의한 스위칭 손실 및 인덕터 코어 손실도 포함된다. 이러한 소자의 전력손실은 Table 1에 나타내었다. 표에서는 주요 소자의 전력손실을 부하전류 I_o 와 관련도에 따라 정리하였다. 즉 부하전류와 관계없는 손실을 I_o^0 로 표현하였고, 부하전류에 비례하는 손실을 I_o^1 로 하였으며, 부하전류 제곱에 비례하는 손실을 I_o^2 로 나타내었다.

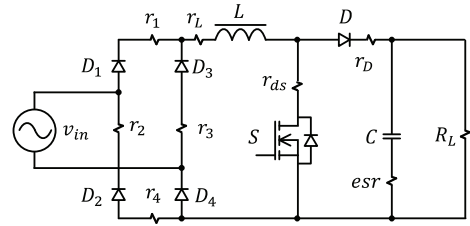


Fig. 4. Basic circuit considering internal loss resistance.

본 논문에서는 부하전류의 관련도에 따라 정리된 전력손실의 계수를 각각 K_0 , K_1 , K_2 로 정의하고 K 를 손실인자(loss factor)로 정의하였다. 손실인자 K 는 부하전류와 관련된 소자의 전력손실 계수이며 식 (11)은 K_0 이고, 식 (12)는 K_1 이며, 식 (13)은 K_2 이다. 일반적으로 본 논문에서 고려하고 있는 단상 PFC이외에도 브릿지리스 PFC 등과 같은 회로방식의 전력 손실인자를 앞에서 언급한 동일한 방식으로 구할 수 있다. 이 경우 당연히 손실계수 K_0 , K_1 , K_2 의 형태는 달라지지만 항상 3개 항으로 구분된다. 따라서 일반적인 스위칭 정류기 회로는 부하전류 I_o 기여도에 따라 3개의 손실계수 항으로 구분된다는 것을 알 수 있다.

$$K_0 = \frac{1}{2} \cdot V_o \cdot Q_{sw} \cdot f_{sw} + \frac{1}{2} \cdot V_o \cdot Q_D \cdot f_{sw} + V_c \cdot I_c \quad (11)$$

$$K_1 = V_{F_D} + \left(\frac{4\sqrt{2} V_o}{\pi \cdot V_{in}} \cdot V_{F_bg} \right) \quad (12)$$

$$K_2 = \left(\frac{V_o}{V_{in}} \cdot \sqrt{1 - \frac{8\sqrt{2} V_{in}}{3\pi V_o}} \right)^2 \cdot R_{on} + \left(\frac{V_o}{V_{in}} \right)^2 \cdot r_L + \left[\left(\frac{L}{A_e N} \cdot \frac{2\sqrt{2} V_o}{V_{in}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_{sw}}{10^3} \right)^{1.46} \cdot V_e \right] \cdot \frac{2}{\pi} + \left(\frac{8\sqrt{2} \cdot V_o}{3\pi \cdot V_{in}} - 1 \right) \cdot esr \quad (13)$$

Fig. 4의 등가회로에 대한 내부전력손실은 식 (14)와 같이 구할 수 있으며, 이 식은 앞에서 언급한 것과 같이 손실인자와 부하전류의 곱으로 표현된다. 회로의 내부전력손실이 식 (14)와 같다면 전력변환 효율은 식 (15)와 같다. 식에서 내부손실이 분모에 있기 때문에 전력손실이 증가할수록 효율이 낮아진다는 것을 알 수 있다.

$$P_L = K_0 \times I_o^0 + K_1 \times I_o^1 + K_2 \times I_o^2 \quad (14)$$

$$\eta = \left(\frac{P_o}{P_o + P_L} \right) \times 100\% \quad (15)$$

Table 1. Correlation between device loss factor and load current

	I_o^0	I_o^1	I_o^2
Main switch	$P_{sw_sw} = \frac{1}{2} \cdot V_o \cdot Q_{sw} \cdot f_{sw}$		$P_{sw_cond} = \left(\frac{V_o}{V_{in}} \cdot \sqrt{1 - \frac{8\sqrt{2} V_{in}}{3\pi V_o}} \right)^2 \cdot R_{on} \cdot I_o^2$
Switching diode	$P_{D_sw} = \frac{1}{2} \cdot V_o \cdot Q_D \cdot f_{sw}$	$P_{D_cond} = V_{F,D} \cdot I_o$	
Inductor			$P_{L_cond} = \left(\frac{V_o}{V_{in}} \right)^2 \cdot r_L \cdot I_o^2$ $P_{L_core} = \left[\left(\frac{L}{A_e N} \cdot \frac{2\sqrt{2} V_o}{V_{in}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_{sw}}{10^3} \right)^{1.46} \cdot V_e \right] \cdot \frac{2}{\pi} \cdot I_o^2$
Bridge diode		$P_{bg} = \left(\frac{4\sqrt{2} V_o}{\pi \cdot V_{in}} \cdot V_{F,bg} \right) \cdot I_o$	
Capacitor			$P_{co} = \left(\frac{8\sqrt{2} \cdot V_o}{3\pi \cdot V_{in}} - 1 \right) \cdot esr \cdot I_o^2$

4. 평가용 PFC 정류기의 전기 사양

앞 절에서 설명된 손실인자의 전력변환 효율 특성분석에 대한 유효성을 확인하기 위해서 Table 2와 같은 PFC 스위칭 정류기의 전기적 사양을 정하였다. 입력전압은 230V, 출력전압은 380V, 최대출력은 2.5kW이며 스위칭 주파수는 60kHz이다. 이때 설계된 소자의 세부정격과 내부 기생소자는 Table 3에 정리하여 나타내었다. 특히 주요 소자의 내부 손실 발생 기생값은 소자의 데이터 시트를 참조하였으며, 보조전원 전력은 제어용 소자의 정격을 참조하여 결정하였다.

Table 2. Electrical specifications of PFC rectifier

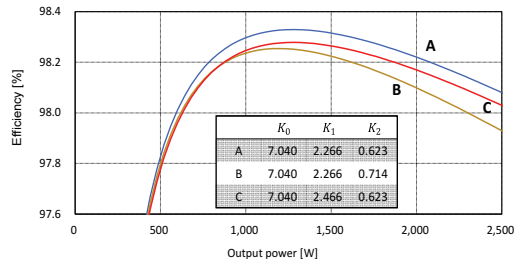
Parameters	Value	Unit
Input voltage	Vin	230 Vrms
Output voltage	Vo	380 Vdc
Maximum power	P _{omax}	2.5 kW
Resonant frequency	fo	60 kHz

Table 3. PFC rectifier components and values

Parameters	Unit	Value
Inductance	μH	600
Cross-sectional area of core	cm ²	0.66
Volume of core	cm ³	10.6
Wire resistance	mΩ	30
Switch capacitance	nF	0.15
Switch on resistance	mΩ	50
Capacitor ESR	Ω	0.3
Auxiliary power	W	6.0

5. 내부손실과 전력변환 효율분석

Fig. 5는 손실인자에 의한 전력변환 효율 특성의 변화를 나타낸 것이다. 부하전력은 최대 2.5kW까지 분석하였으며 최대 효율은 98.2%를 넘는 고효율 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그래프에서 효율 손실인자는 3가지 경우의 소자 특성 변화를 반영한 결과이며, 우선 A는 Table 2에서 적용된 소자의 내부 기생값을 반영한 결과이다. B는 스위치 온저항 R_{on} 이 150mΩ으로 증가한 경우이고, C는 부스트 다이오드의 온전압 $V_{F,D}$ 이 0.4V에서 0.6V로 증가한 경우이다. 즉 손실인자 K_0 는 세 경우 모두 동일하며, B의 경우 K_2 만 변경되고, C의 경우에는 K_1 가 변경된 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 다이오드 온전압 증가보다 스위치 온저항의 증가가 전반적인 부하범위에 대해 내부 손실증가가 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 Table 3의 회로가 Table 4의 소자 특성을 갖는 경우 손실인자의 부하특성을 나타낸 것이다. 앞 절에서 설명했듯이 그림에서 K_0 는 부하에 무관하고, K_1 는 선형 증가하며, K_2 는 계급에 비례한다는 것을 알 수 있다.

**Fig. 5.** Efficiency characteristics according to changes in loss factors.

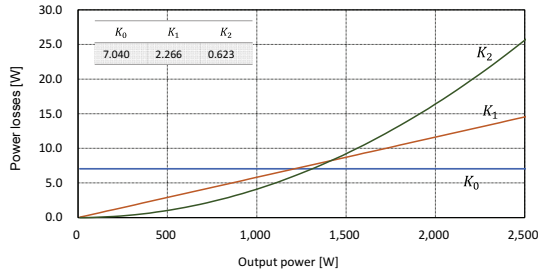


Fig. 6. Internal power loss characteristics by loss factor.

Fig. 7은 본 논문에서 제안한 손실인자를 반영한 전력변환 효율을 부하전력에 대해 나타낸 것이다. Table 3의 회로 정격과 표4의 개별소자 특성을 갖는 경우이며, 실선은 손실인자를 반영한 이론값이다. 이론값에 대한 유효성을 확인하기 위해서 TI(Texas instrument)사에서 제공하는 평가용 전원 모듈 TIDA-00779에 대한 실험 데이터를 측정하여 비교하였으며 각 점은 측정된 효율 데이터이다. 그림에서 두 방식의 효율특성이 전부하전력에 대해 비교적 유사한 형태를 유지하고 있으며 특히 중부하 이상에서 높은 유사성을 갖는다. 저전력에서 높은 효율 측정값이 나타내는 것은 부하전력과 관계없는 K_0 의 오차라고 판단된다.

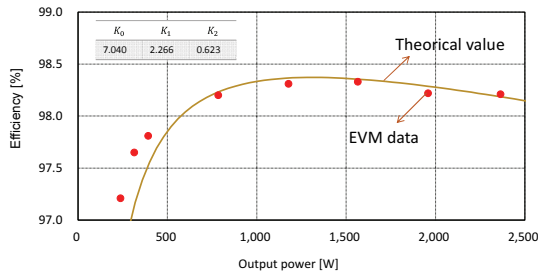


Fig. 7. Comparison of power conversion efficiency.

6. 결론

본 논문에서는 단상 PFC 스위칭 정류기의 전력변환 효율분석을 체계적으로 수행하기 위한 이론적인 방법을 제안하였다. 부스트형 PFC는 정상상태 해석 결과를 이용하여 부하전력 및 부하전류와 관련성이 높은 순서대로 정리하여 손실인자(loss factor) 개념을 도입하였고, 각 주요 소자에 대한 손실인자를 정리하여 나타내었다. 특히 본 논문에서는 손실인자에 대한 정류기의 내부손실과 전력변환 효율에 대한 기여도를 그래프 등으로 나타내어 직관적으로 이해할 수 있도록 하였다. 끝으로 손실인자를 반영한 효율분석 결과에 대한 유효성을 확인하기 위해서

2.5kW급 PFC 정류기에 대한 손실과 효율 분석을 수행하고 그 결과를 평가용 2.5kW급 PFC 회로의 데이터와 비교하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 손실인자가 반영된 전력변환 효율분석에 대한 유용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20018577).

참고문헌

- Haider, Michael, et al. "Analytical calculation of the residual ZVS losses of TCM-operated single-phase PFC rectifiers." IEEE Open Journal of Power Electronics 2, 250-264, 2021.
- Cui, Yujiao, et al. "An efficiency-improved single-phase PFC rectifier with active power decoupling." IEEE Transactions on Power Electronics 37.9, 10784-10796, 2022
- Ma, Hui, et al. "A novel single-phase five-level hybrid rectifier using two active switches." IET Power Electronics 14.1, 158-168, 2021.
- Patel, Nil, et al. "High-Efficiency Single-Stage Single-Phase Bidirectional PFC Converter for Plug-in EV Charger." IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023.
- Singh, Alakshyender, Jitendra Gupta, and Bhim Singh. "Design and control of two stage battery charger for low voltage electric vehicles using high gain buck-boost pfc ac-dc converter." IEEE Transactions on Industry Applications, 2023.
- Liu, Xueshan, et al. "Single-stage integrated buck-Flyback PFC converter with low total harmonic distortion control." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024.
- Torrisi, Marco, et al. "GaN HEMT Improves Overall Performance in ZVS Totem Pole PFC Converters." 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2023.
- Patel, Nil, et al. "A Soft-Switched Single-Stage Single-Phase PFC Converter for Bidirectional Plug-In EV Charger." IEEE Transactions on Industry Applications, 2023.

접수일: 2024년 5월 23일, 심사일: 2024년 6월 12일,
게재확정일: 2024년 6월 21일