

IPT 기반 1 kW 소형풍력발전전원장치를 위한 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터

박범수¹, 유준우¹, 공성운¹, 강민경¹, 문유진², 김은수^{1†}
전주대학교¹, (주)솔루엠²

3-Phase Single Stage AC-DC Converter for a 1 kW Small Wind Power System based on IPT

Beom-su Park¹, Jun-woo Yoo¹, Sung-woon Gong¹, Min-Gyeong Kang¹,
Yu-jin Moon², Eun-Soo Kim^{1†}
Jeonju University¹, SOLUM²

1. 서 론

3상 풍력발전기 터빈은 풍속 또는 풍향에 따라 나셀과 함께 회전하기 때문에, 고정 타워에 있는 배터리 충전기 또는 계통 연계형 인버터에 연결 시 전선 꼬임 등 전기안정성을 확보하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 나셀의 회전을 위해 슬립링과 브러쉬를 사용하게 되는데, 브러쉬를 통해 고전류가 전도될 때 스파크(Spark) 및 집점 마모로 인해 풍력발전시스템의 신뢰성이 떨어지게 되고 풍력발전기의 나셀이 회전함으로 브러쉬가 마모되는 단점이 발생한다. 본 논문에서는 3상 중·소형 풍력발전기의 집점 마모로 인한 신뢰성 감소 및 나셀의 회전으로 인한 브러쉬 마모와 같은 단점을 보완하고자 기 제안된 고집적 고효율 단일전력단 AC-DC 컨버터에 S-S(Series-Series) 보상회로 적용 IPT 기반 무선전력전송회로^[1]를 접목하여 신뢰성 및 효율 및 집적화를 증가시켰고, 풍속의 변화에 따라 발전된 전력과 공급되는 전력의 균형을 잡기 위해 출력전압(V_o) 제어가 아닌 DC 링크전압(V_{Link})을 제어하여 회로의 1, 2차측 간 별도의 통신제어를 하지 않아 제어의 안정성을 높이고, 복잡성을 줄였다^[2]. 이에 대한 1 kW급 시제를 제작하였으며, 실험을 통해 회로의 타당성을 검증하였다.

2. 제안한 IPT 3상 단일전력단 AD-DC 컨버터

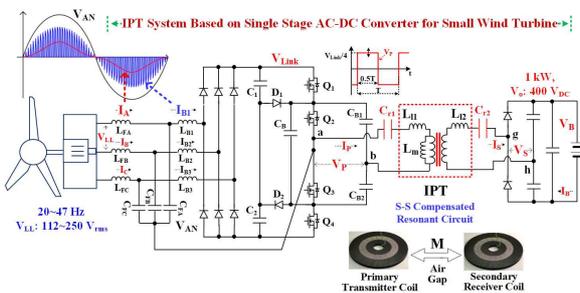


그림 1. 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터

3상 풍력발전기 발전 선간전압(V_{LL} : 112 V_{rms} ~ 250 V_{rms})을 입력전원으로 하여 계통연계를 위한 출력전압(V_o : 400 V_{DC})을 제어할 수 있는 CLLC 공진회로(S-S 보상회로)를 접목한 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터는 입력필터인덕터(L_{FA} , L_{FB} , L_{FC}) 및 입력필터커패시터(C_{FA} , C_{FB} , C_{FC}), 승압인덕터(L_{B1} , L_{B2} , L_{B3}), 입력정류다이오드, 분압링크커패시터(C_1 , C_2), 플라이커패시터(C_B), 분압커패시터(C_{B1} , C_{B2}), 순환다이오드(D_1 , D_2) 및 4개의

주스위칭소자(Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4)로 구성되며, 유도전력전송을 위한 1, 2차측 비접촉 변압기 커플러와 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})를 갖는 S-S 보상회로와 계통 연계에 대응하기 위해 출력정류부의 출력전압 승압을 위한 더블러 커패시터를 포함한 소형풍력발전 시스템을 그림 1에 나타냈다. 또한 S-S 보상회로의 공진주파수에서(f_r) 이득변화가 없음으로 공진주파수 부근 일정 스위칭 주파수에서 스위칭 동작을 하여 출력전압(V_o)을 제어하는 것이 아닌 링크전압(V_{Link})을 제어함으로써 1, 2차 측 간 통신제어를 따로 필요로 하지 않아 제어의 안정성을 높였다.

2.1 IPT 기반 풍력발전시스템 비접촉 커플러 설계

자기유도무선전력전송(IPT)에 사용된 커플러변압기는 PM 11 재질의 코어를 사용하여 1차측 송신패드 및 2차측 수신패드를 원형 형태의 코어($R/r/H$: 100 mm/5 mm/4 mm)에 Spiral 권선 방식으로 제작하였다.

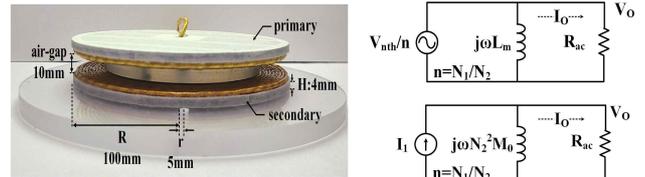


그림 2. 제작한 비접촉 변압기 및 공진주파수(f_r)에서 동작하고 2차측에서 바라본 등가회로

제안한 S-S 보상회로 적용 IPT 기반 무선전력전송 등가회로에서 AC 부하저항에 걸리는 출력전압(V_o)은 식 (1)에 나타내었다. I_1 은 2차측에서 바라본 입력 정류원이며, ω_0 는 공진점에서의 각 주파수, R_{ac} 은 AC 부하저항, M_0 은 상호 인덕턴스이다. 이때, AC 부하저항 R_{ac} 은 2차측 코일의 자체 저항 성분에 비하여 매우 크기 때문에 식 (2)과 같이 출력 전압(V_o)을 근사화시킬 수 있고 이에 따라 부하 전류(I_o)는 식 (3)로 표현할 수 있게 된다. 이때의 출력 전력(P_o)을 식 (4)와 같이 부하 전류(I_o)와의 관계로 나타내었다. 상호 인덕턴스(M_0)의 임피던스가 AC 등가저항(R_{ac})의 임피던스와 같을 때 최대 전력전달이 가능하기 때문에 풍력발전시스템 비접촉 커플러 2차측 권선 수는 식 (5)를 통해 19턴으로 설계 하였고 1차측 권선 수는 13턴으로 설계하였다.

$$V_o = j\omega_0 N_2^2 M_0 I_1 \left(\frac{R_{ac}}{R_2 + R_{ac}} \right) \quad (1) \quad V_o \cong j\omega_0 N_2^2 M_0 I_1 \quad (2)$$

$$I_O = I_1 \frac{\omega_0 N_2^2 M_0}{\omega_0 N_2^2 M_0 + R_{ac}} \quad (3) \quad P_O = I_O^2 R_{ac} \quad (4)$$

$$N_2^2 \omega_0 M_0 = R_{ac} \quad (5)$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{R_{ac}}{\omega_0 M_0}}$$

$$= I_1^2 \left[\frac{\omega_0 M_0}{\sqrt{R_{ac}} + \frac{\sqrt{R_{ac}}}{N_2}} \right]^2$$

2.1 CLLC DC-DC단 S-S보상회로 이득특성 분석

그림 3은 제안된 회로의 AC 등가모델 및 이득특성이며, 비접촉 변압기의 1차 및 2차측 커플러의 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l2}), 자화인덕턴스(L_m), 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2}), AC 등가저항(R_{ac})로 구성된다. SS보상회로의 입·출력 전압 이득은 식(6)을 통해 나타내었다. f_m 은 1차 및 2차측 공진커패시터와 2차측 자기인덕턴스 및 자화인덕턴스와의 합으로 발생하는 공진이고, f_r 은 1차 및 2차측 커플러의 누설인덕턴스와 공진커패시터의 조합으로 발생하는 공진이며, AC 등가저항의 변화에도 이득특성에 영향을 주지 않는다. f_p 는 1차측 자기인덕턴스와 공진커패시터 사이의 공진으로, AC 등가저항 변화에 따라 이득특성의 가장 크게 변한다. 이득특성 변화를 최소화하기 위해 고정된 스위칭주파수 f_s 를 부하에 따라 이득특성이 변하지 않는 두 번째 공진주파수인 f_r (80 kHz)보다 높은 85 kHz로 설정하여 위상제어(Phase-shift Modulation, PM)를 통해 링크전압(V_{Link})을 가변시켜 부하 별 출력전압(V_o : 400V_{DC})을 제어하였다.

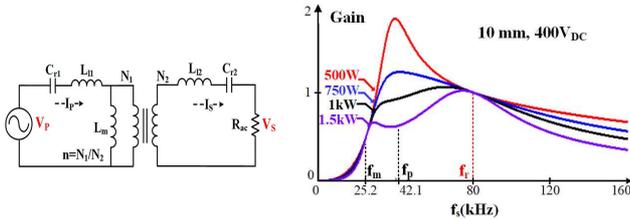


그림 3. SS 보상회로 등가 모델 및 이득 특성

$$G_v = \frac{V_S}{V_P} = \left| \frac{s^3 R_{ac} C_{r1} C_{r2} L_m}{(1 + s^2 A)(1 + s^2 B) + s R_{ac} C_{r2} (1 + s^2 C)} \right| \quad (6)$$

3. 실험 결과

표 1. 풍력발전기 입·출력 사양 및 회로 파라미터

주요정격	풍력발전기 선간전압(V_{LL})/주파수(f_0)	90~260V _{LLrms} /20~47Hz
	출력전압(V_o)/정격출력(P_o)	400V _{DC} /1kW
사용소자	SIC Switching device($Q_1 \sim Q_4$)	UJ3C120040K3S [1200V/65A/35mΩ]
	Circulating diodes(D_1, D_2)	UJ3D6560KSD [650V/60A/1.5V _f]
	SIC input rectifier diodes	GP2D050A120B [1200V/50A/1.4V _f]
	Shottky output diodes	UJ3D6560KSD [650V/60A/1.5V _f]
파라미터	$L_{FA} \sim L_{FC}/C_{FA} \sim C_{FC}/L_{B1} \sim L_{B3}$	10.8mH/3.3uF/60uH

본 논문에서는 제안한 1kW급 소형풍력발전전원장치의 적용 타당성 검증에 위해 그림 4와 같이 1kW 풍력발전모의실험세트를 구축하여 실험을 진행하였다. 그림 5와 그림 6의 실험 결과에 따르면, S-S 보상회로에 인가된 1차측 구형과전압(V_p)에

비해 지연된 공진전류(I_p) 흐름으로 1차측 스위칭소자들은 영전압스위칭(ZVS) 동작함을 확인할 수 있었다. 또한 일정 부하 이상에서 입력역률(PF)이 0.99 이상이며, 정격부하(1 kW)에서는 THD_i가 3.79%로 낮게 나타나는 것을 확인했다. 링크전압(V_{Link}) 제어 시 90% 이상의 높은 효율을 유지하며, 1kW 정격 부하 조건에서 93.61%으로 최대 효율특성을 달성했다. 출력전압 제어와 링크전압 제어를 비교했을 때 링크전압(V_{Link})을 제어하더라도 부하별 오차범위가 거의 없는 출력전압(V_o)을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

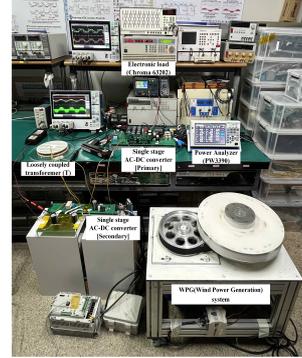
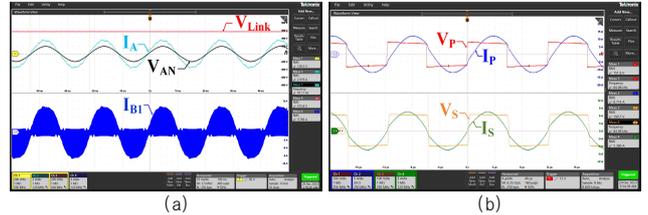
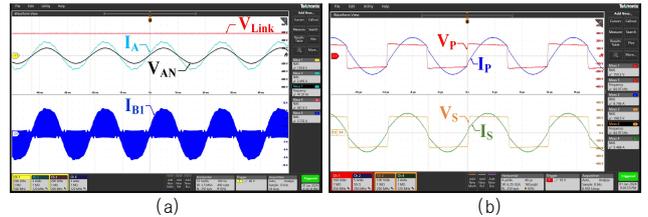


그림 4. 1kW 풍력발전모의실험세트 실험 환경



(a) [Ch1: 200 V/div, Ch2: 2 A/div, Ch3: 200 V/div, Ch4: 3 A/div, 10ms/div.]
(b) [Ch1: 100 V/div, Ch2: 5 A/div, Ch3: 100 V/div, Ch4: 3 A/div, 4μs/div.]

그림 5. 출력전압제어(V_o : 400 V_{DC}) 및 부하조건(P_o : 998 W) 실험파형



(a) [Ch1: 200 V/div, Ch2: 2 A/div, Ch3: 200 V/div, Ch4: 3 A/div, 10ms/div.]
(b) [Ch1: 100 V/div, Ch2: 5 A/div, Ch3: 100 V/div, Ch4: 3 A/div, 4μs/div.]

그림 6. 링크전압제어(V_{Link} : 565 V_{DC}) 및 부하조건(P_o : 1 kW) 실험파형

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF 2022R1F1A1074862)

참고 문헌

- [1] Kim, Min-Ji, Jeong-Won Woo, and Eun-Soo Kim. "Single Stage AC-DC Converter for Wireless Power Transfer Operating within Wide Voltage Control Range." Journal of Power Electronics. Springer Science and Business Media LLC, March 5, 2021.
- [2] A. Merabet, K. T. Ahmed, H. Ibrahim and R. Beguenane, "Implementation of Sliding Mode Control System for Generator and Grid Sides Control of Wind Energy Conversion System," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 3, pp. 1327-1335, July 2016