IPT 기반 소형 풍력발전 전원장치

문유진, 박범수, 유준우, 김은수⁺ 전주대학교¹

Small Wind Power System based on IPT

Y.J Moon¹, Beom-Su Park¹, Jun-Woo Yoo¹, E.S Kim¹⁺ JeonJu University¹

1. 서론

lkW ~ 3kW 중소형풍력발전시스템은 도시나 농어촌 마을에 서 자가발전을 위한 독립형 및 계통 연계형 풍력발전시스템 뿐 만 아니라 해양플랜트 설비전원용으로 확장 운영되고 있으며, 효율증대를 위해 발전기 승합화에 따라 신뢰성, 전기적 안정성 이 중요하다. 특히 3상 풍력발전기가 풍속에 따라 나셀 (Nacelle)과 함께 회전할 수 있으므로 고정 타워에 있는 배터리 충전기 또는 계통연계인버터에 연결 시 전선꼬임 등 전기안정 성을 확보하기 어렵다. 이를 보완하고 나셀(Nacelle)의 회전을 위해 슬립링과 브러쉬(Brush)를 사용하게 되는데, 브러쉬를 통해 전류가 흐를 때 스파크(Spark) 및 접점 마모로 인해 풍력발 전시스템의 신뢰성이 떨어지게 되는 단점이 발생한다. 이를 대 응하기 위한 무선전력전송 연구들이 최근 진행되고 있다^[1].



Fig. 1 (a) Yaw IPT System and (b) conventional converter for small wind turbine system

그림 1에 나타낸 바와 같이 IPT 기반 풍력발전시스템과 3상 PFC AC-DC 컨버터와 절연을 위한 DC-DC 컨버터로 구성된 중소형풍력발전전원장치가 적용되고 있다. 하지만 주회로 구성 이 복잡하고, 고집적화 및 가격상승 등 한계성을 갖는다.

본 논문에서는 단일전력단 AC-DC 컨버터를 응용하여 그림 2(a)에서처럼 입력역률(PF) 및 효율 개선과 신뢰성 향상을 위 해 소형풍력발전기 나셀의 브러쉬 마모를 보완함과 동시에 전 기안전성을 확보할 수 있는 3상 단일전력단 기반의 CLLC 공 진회로를 적용한 자기유도무선전력전송(IPT) 풍력발전전원장치 를 제안하고, IPT용 비접촉 커플러 설계 및 PSIM 전력변환회 로 시뮬레이션으로 구현하여 적용 가능성을 검증하였다.

2. 제안된 IPT 3상 단일전력단 교류-직류 컨버터

3상 풍력발전기 발전 선간전압(VLL: 112 Vac~260 Vac)을 입 력전원으로 하여 넓은 출력전압 범위(Vo: 39 V_{DC}~60 V_{DC})을 제어할 수 있는 CLLC 공진회로를 접목한 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터는 풍력발전기 3상 AC 전원의 입력역률 및 전 고조파왜형율을 개선하기 위해 3상 입력단에 필터커패시터(CFa ~CFc)와 필터인덕터(LFa~LFc)가 연결되어 있고, 필터커패시터 의 중성점을 주스위칭소자 Q2소스와 Q2드레인 사이에 연결하 였다. 승압인턱터(L_{B1}~L_{B3})를 입력정류다이오드에 연결하여 고 스위칭주파수(fs: 85kHz)에서 정된 일정 스위칭소자 (Q₁,Q₂,Q₃,Q₄)의 위상제어(Phase-shifted Modulation, D_P)에 따 라 1차측 공진회로단(a-b)에 가변링크전압(V_{Link}/4)에 따른 50% 듀티의 구형파전압(Vp)이 인가되어 전력제어가 가능하다.





3. IPT 적용 커플러 설계 및 S-S(직렬-직렬) 보상회로의 이득 분석

유도전력전송(IPT)에 사용된 커플러 변압기는 PM11 재질의 코어를 사용하여 1차측 송신 패드 및 2차측 수신 패드를 원형 형태의 코어 (R/r/H : 50mm/5mm/4mm)에 Spiral 권선방식으 로 시뮬레이션 검토하였다. 또한, 권선의 두께를 고려하여 공극 을 10mm로 선정하였다.

무효전력을 최소화하고 최대전력을 전달할 수 있는 1, 2차측 커플러 권선 수는 1차 및 2차 누설인덕턴스(L₁, L₂)와 공진커 패시터(C_{r1}, C_{r2})에 튜닝(Turning)된 공진주파수(f_r)와 같은 스위 칭주파수(f_s)에서 동작할 때 고려된다. 커플러의 1차권선과 2차 권선 사이의 상호인덕턴스(M)는 두 커플러의 자기인덕턴스(L_P, L_S)의 크기, 권선 수, 공극에 의해 결정되며 이때 커플링 계수 (k)는 상호인덕턴스(M)와 밀접한 관계를 갖는다. 여기서 코어 의 크기와 공극 및 형상이 결정되면 상호인덕턴스(M)가 고정 된다. 따라서 인덕턴스는 턴-수의 제곱에 비례하므로 Maxwell 3D 전자기장 분석을 통해 결정된 코어 형상 (R/r/H : 50mm/5mm/4mm) 및 공극 (10mm)에 대해 커플러 변압기의 파라미터 값을 추출할 수 있다^[2].



Fig. 3 (a)Single-turn FEA model and (b) an equivalent circuit for IPT design

커플러 코어 형상 (R/r/H : 50 mm/5 mm/4 mm)과 공극 (10mm)에서 Maxwell 3D 전자기장 분석을 통해 단일-턴에서 파라미터를 추출하여 104.85 nH의 상호인덕턴스(M₀)를 얻었다. 그림 3의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 60 V의 출력전압(V₀) 과 1.5kW의 정격 출력부하에서 커플러의 2차측 턴수(N₂)는 6 턴, 1차측 턴수(N₁)는 1차 공진탱크의 단자(a, b)의 전압(V₽)이 3상 링크 전압(VLNK)의 1/4이 인가되므로, 15턴으로 결정하였 다. 커플러의 결정된 디자인과 형태를 그림 4(a)에 나타내었다. 그림 4(b)는 1, 2차 커플러 사이의 자속밀도 분포를 나타내었으 며 이때 공극(10mm)에 대해 측정된 파라미터를 표 1에 나타내 었다.



Fig. 4 (a) Coupler and (b) flux flow for Inductive power transfer(IPT)

Table 1 Parameters of IPT coupler

Core Size (R/r/H)	50mm / 5mm / 4mm
Transformer ratio n(N ₁ /N ₂)/ air-gap	2.4 (15/6)/ 10 mm
Pri./Sec. Self inductance (L _P /L _S)	32.58 uH/5.89 uH
Magnetizing inductance (L _m)	23.55 uH
Pri./Sec. Leakage inductance (L _{I1} /L _{I2})	9.03 uH/2.122 uH
Coupling coefficient (k)	0.68
Resonance Frequency (fr)	85 kHz
Resonant capacitor (Cr1/Cr2)	388 nE / 1652 nE



Fig. 5 CLLC equivalent circuit for S-S compensation circuit

$$G_{v} = \frac{V_{S1}}{V_{P1}} = \left| \frac{s^{3} R_{uc} C_{r1} C_{r2} nk \sqrt{L_{P} L_{S}}}{(1 + s^{2} A)(1 + s^{2} B) + s R_{uc} C_{r2} (1 + s^{2} C)} \right|$$
(1)

$$\begin{split} A &= \frac{1}{\omega_1^2} = C_{r2}L_2 + C_{r1}\left(nk\sqrt{L_PL_S}\right) \frac{1 + s^2 C_{r2} L_{l2}}{1 + s^2 C_{r1} L_{l1}} \\ k &= \frac{L_m}{n\sqrt{L_PL_S}} \qquad B = \frac{1}{\omega_2^2} = C_{r1}L_{l1} \qquad C = \frac{1}{\omega_3^2} = C_{r1}L_F \end{split}$$

그림 5는 IPT 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터의 S-S(직렬-직렬) 보상회로의 등가모델이다. 유도전력전송(IPT)를 위한 컨 버터의 공진전압이득 특성해석은 FHA(Fundamental Harmonic Approximation)를 통해 기본파만 적용하여 해석하였다.



Fig. 6 Gain characteristics of SS compensation circuit according to load in the air gap (10mm)

따라서, 그림 6은 1.5 kW 정격 출력부하와 출력전압제어 범 위(V₀: 39 V_{DC}~60 V_{DC}), 공극(10 mm)에서 표 1의 파라미터를 바탕으로 식 (1)을 사용하여 S-S 보상회로의 공진이득특성을 나타내었다. 또한, 고정된 공극에서 동작하기 때문에 부하변화 에 따른 이득변화가 없는 공진주파수(f_r)를 스위칭주파수(f_s: 85kHz)로 선정하였다.

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 IPT 커플러를 원형형태의 코어 (R/r/H : 50mm/5mm/4mm)에 Spiral 권선방식으로 제작 및 특성 비교를 통해 최적설계를 하였다. 또한, 결정된 코어형상과 공극(10mm) 에서 측정된 파라미터를 가지고 PSIM 전력변환회로 시뮬레이 션으로 적용하였으며, 그림 7에 나타낸 바와 같이 정격 입출력 전압범위에서 안정적인 동작과 제어 가능함을 확인하였다.



 $\begin{array}{l} \text{rg. 7 operation waveforms of strigterstage AC-bc converter based on IPT (a) } V_{LL}: 250 \ V_{\text{rms}}, \ f_{ac}: 40 \ \text{Hz}, \ f_{s}: 85 \ \text{kHz}, \ V_{o}: 395.7 V_{\text{DC}}, \ P_{o}: 1.5 \text{kW}, \ (b) \ V_{LL}: 250 \ V_{\text{rms}}, \ f_{ac}: 40 \ \text{Hz}, \ f_{s}: 85 \ \text{kHz}, \ V_{o}: 60 V_{\text{DC}}, \ P_{o}: \ V_{\text{Link}}: 594.6 V_{\text{DC}}, \ P_{o}: \ 1.5 \text{kW} \end{array}$



참 고 문 헌

- [1] S. Piriienko, W. V. Wang, M. Neuburger, D. J. Thrimawithana and A. Balakhontsev, "Nacelle-to-Tower Multilevel IPT System for Small-Scale Wind Turbines," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 5, pp. 5043–5054, May 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3032183.
- [2] Min Ji Kim, Jeong Won Woo and Eun Soo Kim. (2021). Single stage AC-DC converter for wireless power transfer operating within wide voltage control range. Journal of Power Electronics, 21(5), 768-781.