

보조권선 적용 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터

박범수, 김상규, 강민경, 김은수[†]
 전주대학교

S-LLC Single Stage AC-DC Converter With Auxiliary Windings

Beomsu Park, Sangkyu Kim, Minkyung Kang, Eunsoo Kim[†]
 Jeonju University

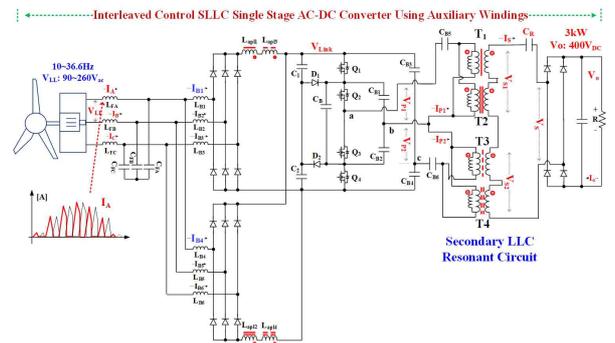
1. 서 론

최근 유가상승 및 지구 온난화 문제로 인해 화석 에너지를 대체할 에너지자원으로 신재생에너지가 활발히 연구되고 있다. 이러한 신재생에너지 중 바람에너지를 사용한 풍력발전시스템 활용 전기생산은 환경 친화적이며 경제적으로 경쟁력이 있는 신재생에너지이다. 최근에는 소규모 풍력터빈을 사용한 소형풍력발전시스템을 활용하여 전기를 생산하기 위한 기술개발이 많이 진행되는 중이다. 소형풍력발전시스템을 위한 고집적 및 고효율화를 위해 3상 PFC와 DC-DC단을 하나의 회로로 결합한 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터를 기 제안하였다.^[1] 하지만 3상 단일전력단 AC-DC 컨버터의 입력역률 및 THD_i 개선을 위해 입력단 승압인덕터가 불연속모드전류(DCM)로 동작되어야 한다. 용량증대를 위해서는 PFC 단 승압인덕터스 값을 저감하여 승압제어범위를 조절 할 수 있지만 피크전류 증가에 의한 스위칭소자의 전류스트레스 때문에 적용에 한계가 있었다.

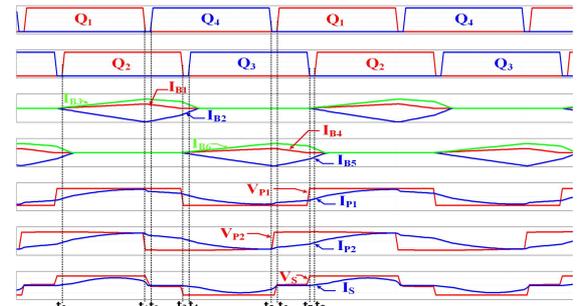
본 논문에서는 3kW로 용량증대 및 역률(PF)개선과 전고조파왜형률(THD_i) 저감, 효율 개선을 위해 보조권선 적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터를 제안하여^[2], 회로의 동작모드와 이득분석을 수행하였고, 제안된 컨버터에 대한 PSIM 시뮬레이션을 통해 적용 가능성을 검증하였다.

2. 제안된 보조권선 적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터

3상 풍력발전기발전 선간전압(V_{LL} : 90 V_{rms} ~260 V_{rms})을 입력으로 하여 계통연계를 위한 출력전압(V_o : 400 V_{DC})을 제어할 수 있는 보조권선적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터 구성은 그림 1(a)에 나타낸 바와 같이 PFC단에 풍력발전기 3상 AC전원 입력역률 및 전고조파왜형률(THD_i)을 개선하기 위해 3상 입력필터($L_{FA} \sim L_{FC}$, $C_{FA} \sim C_{FC}$)가 연결되어 있고, 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$, $L_{B4} \sim L_{B6}$), 입력정류다이오드, 분압링크/플라잉커패시터(C_1 , C_2/C_B), 분압커패시터 (C_{B1}, C_{B2} , C_{B3}, C_{B4}), 순환다이오드(D_1 , D_2) 및 4개의 주 스위칭소자(Q_1, Q_2 , Q_3, Q_4)로 구성되어 있다. DC-DC단에는 변압기의 용량분담을 통한 크기 및 전류불평형 저감을 위해 4개의 변압기(T_1, T_2 , T_3, T_4)를 1차측 병렬, 2차측 직렬로 연결하였다. 또한 2차측 변압기 누설인덕턴스와 공진커패시터(C_R)로 구성된 S-LLC 공진회로로 구성되었으며, 주 스위칭 소자(Q_1, Q_2 , Q_3, Q_4)의 고정된 일정 스위칭주파수에서 위상제어(PM, Phase-Shift Modulation)에 따라 전력제어가 가능하다.



(a) 제안된 보조권선 적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터



(b) 스위칭소자 게이트 신호($Q_1 \sim Q_4$), 승압인덕터 전류($I_{B1} \sim I_{B6}$), 1차측 병렬단 전압/전류($V_{P1,2}/I_{P1,2}$), 2차측 직렬단 전압/전류(V_S/I_S)
 그림 1. 보조권선 적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터 주회로 및 각 부 파형

그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 4개의 스위칭소자(Q_1, Q_2 , Q_3, Q_4)에 의한 위상제어(PM)를 통해 개별 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$, $L_{B4} \sim L_{B6}$)는 불연속전류모드(DCM)로 동작하게 되고 풍력발전기 3상 AC전원 리플저감을 위해서 입력필터 후단에 병렬로 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$, $L_{B4} \sim L_{B6}$)와 입력정류다이오드를 구성하였다. 또한 입력정류다이오드와 분압링크커패시터(C_1 , C_2) 사이에 변압기의 보조권선을 구성하여 보조권선 전압극성에 따라 상단 승압인덕터(L_{B1} , L_{B2} , L_{B3})와 하단 승압인덕터(L_{B4} , L_{B5} , L_{B6})에 에너지 저장 또는 리셋 동작에 따라 승압인덕터($I_{B1} \sim I_{B3}$, $I_{B4} \sim I_{B6}$) 전류가 위상차를 가지고 흐르게 되며 이로 인해 승압인덕터 합 전류가 연속모드로 흐르는 것처럼 보이게 되고 풍력발전기의 입력AC단 필터측에서 바라보았을 때 리플 전류가 저감됨을 볼 수 있다. $t_0 \sim t_1$ 구간에서 주 스위칭소자(Q_1 , Q_2)가 턴온 하면 변압기(T_1, T_2 , T_3, T_4)에는 $V_{Link}/4$ 이 인가되고, 이때 상

단 변압기권선전압이 링크전압(V_{Link})과 같아 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$)에 발전기 상전압(V_{AN}, V_{BN}, V_{CN})이 인가되고 에너지가 축적되게 된다. $t_1 \sim t_3$ 구간 스위칭소자 Q_1 이 턴-오프 되면 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$) 축적된 에너지가 입력정류다이오드를 통해 분압링크커패시터(C_1), 순환다이오드 D_1 의 경로로 리셋 되게 된다. 또한 $t_4 \sim t_5$ 구간 스위칭소자(Q_3, Q_4)가 턴-온 하게 되면 변압기(T_1, T_2, T_3, T_4)에는 반대극성의 $-V_{Link}/4$ 이 인가되고, 이때 하단 변압기권선전압이 링크전압(V_{Link})과 같아 승압인덕터($L_{B4} \sim L_{B6}$)에 발전기 상전압(V_{AN}, V_{BN}, V_{CN})이 인가되며 $t_5 \sim t_7$ 구간 스위칭소자 Q_4 가 턴-오프하면 분압링크커패시터(C_1, C_2)와 순환다이오드 D_2 경로를 통해 리셋하게 되며 각 승압인덕터전류($I_{B1} \sim I_{B3}, I_{B4} \sim I_{B6}$)가 위상차를 두고 흐르고 이로 인해 입력단 리플 전류를 저감하게 된다. 또한 절연된 DC-DC단은 코어사이즈 및 전류불평형을 저감하기 위해 개별 공진탱크에 각각 2개의 변압기(T_1, T_2)와 변압기(T_3, T_4)를 1차측 병렬 2차측 직렬로 연결하였고, 2차측에 공진커패시터(C_R)를 연결하여 2차측에서 공진하는 S-LLC (Secondary-LLC) 회로를 적용하였으며, 1차측 양단(a-b, b-c)은 위상제어와 관계없이 50% 듀티로 구형파 전압이 인가되고 $V_{Link}/2$ 크기의 전압이 인가되는 밸런싱커패시터(C_{B3}, C_{B4})와 $V_{Link}/4$ 크기의 전압이 인가되는 밸런싱커패시터(C_{B1}, C_{B2})의 전압 차에 의해 $V_{Link}/4$ 크기의 전압이 항상 인가되게 된다. 또한 1차측 공진이 아닌 2차측 공진을 활용함으로써 1차측 단자전류(I_{P1}, I_{P2}) 불평형이 최소화되며 ZVS(Zero Voltage Switching) 동작 하게 된다.

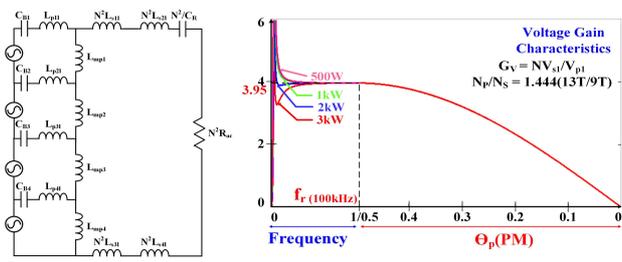


그림 2. S-LLC 공진회로부 등가회로 및 이득특성

$$G_v = 4 \left| \frac{1}{1 + \frac{L_m}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_B} + \frac{j\omega}{R} \left[\frac{4}{N^2} \left(L_m - \frac{1}{\omega^2 C_B} \right) + \left(1 + \frac{L_m}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_B} \right) \left(4L_m - \frac{1}{\omega^2 C_B} \right) \right]} \right| \quad (1)$$

$$G_{\theta_p} = \sqrt{2 - 2\cos(n\pi\theta_p)} \sin \left[\omega + \text{asin} \left(\frac{\sin(n\pi\theta_p)}{\sqrt{2 - 2\cos(n\pi\theta_p)}} \right) \right] G_v \quad (2)$$

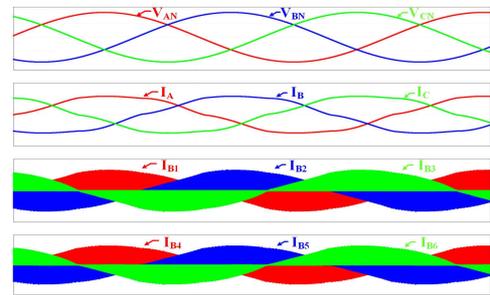
그림 2은 절연된 DC-DC단 S-LLC 등가회로 및 이득특성을 나타내었다. 등가회로는 1차측에서 바라보았을 때를 기준으로 나타냈으며 변압기 4개의 파라미터가 동일하다고 가정하였다. L_{pl} 과 L_{sl} 은 각 변압기 1, 2차측 누설인덕턴스이고 L_m 은 자화인덕턴스이다. C_R 은 2차측 공진회로를 위한 공진커패시터이며 C_B 는 DC바이어스를 막아주기 위한 블로킹커패시터이다. 식 (1)을 통해 등가회로에 대한 입출력 이득특성(G_v)을 나타내었으며 1차측 양단전압($V_{P1,2}$)의 합전압을 FHA(Fourier Harmonic Analysis)를 적용함에 따라 식 (2)처럼 나타내었고 위상제어(PM)에 따른 이득특성을 동시에 나타내었다. 본 논문에 제안된 보조권선적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터는 공진주파수(f_r) 부근 고정된 일정스위칭주파수(f_s)에서 위상제어(PM)를 통해 링크전압(V_{Link})을 가변시켜 출력전압(V_o)을 제어하게 되고 위상제어가 Out-Phase(0°) 동작시 출력전압(V_o)이 0까지 떨어져 단락 및 과전류 시에도 회로보호가 가능하다.

3. 결론

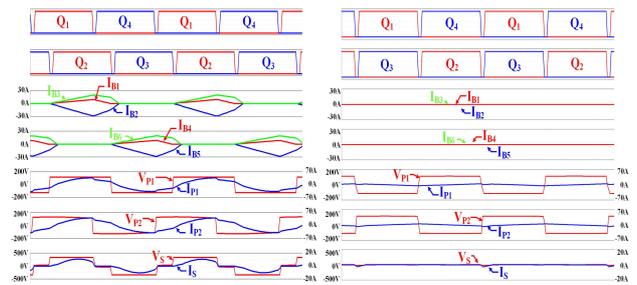
본 논문에서는 풍력발전시스템의 3kW 용량증대를 위한 보조권선 적용 인터리브 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터를 PSIM 전력변환 시뮬레이터를 사용하여 구현 및 적용 분석하였다. 그림 3(a)와 같이 3상 교류입력전원의 파형을 보았을 때 상전압($V_{AN} \sim V_{CN}$)과 상전류($I_A \sim I_C$)가 동상으로 나타나 입력역률(PF)이 개선된 것을 볼 수 있고, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 풍력발전기 선간전압(V_{LL} : 260 V_{rms}), 출력 3kW 부하조건에서 고정된 일정스위칭주파수(f_s : 100 kHz)에서 위상제어(PM)를 통해 계통연계를 위한 출력전압(400 V_{DC})이 제어됨을 확인하였으며 2차측 S-LLC 공진동작특성에 따라 1차측 주 스위칭소자의 ZVS 동작을 확인할 수 있었다. 또한 위상이 Out-Phase(0°) 동작 시 회로의 전압이득이 0까지 떨어져 과전류 보호기능도 확인할 수 있었다.

표 1. 풍력발전기 입·출력 사양 및 회로 파라미터

주요정격	풍력발전기 전기전압	90~260V _{LL,ac}
	출력전압(V_o)/출력(P_o)	400V _{DC} /3kW
변압기 파라미터	1, 2차측 자기인덕턴스(L_p/L_s)	119.44uH/57.25uH
	1, 2차측 누설인덕턴스(L_{pl}, L_{sl})	1.406uH/1.413uH
	자화 인덕턴스(L_m)	118uH
파라미터	턴 수비 N_1/N_2 /보조권선(N_s)	1.44(13T/9T)/26T
	$L_{FA} \sim L_{FB}/C_{FA} \sim C_{FB}/L_{B1} \sim L_{B6}$	10.8mH/3.3uF/30uH
파라미터	$C_R/C_{B1} \sim C_{B2}/C_{B3} \sim C_{B4}$	330nF/2.2uF/3.3uF/20uF



(a) 상전압($V_{AN} \sim V_{CN}$), 입력전류($I_A \sim I_C$), 승압인덕터 전류($I_{B1} \sim I_{B6}$)



(b) 부하(3kW) 동작 시 파형 (c) 부하 단락 동작시 파형

(b) V_{LL} :260V_{rms}, f_g :36.6Hz, f_s :100kHz V_o :400V_{DC}, P_o :3kW, V_{Link} :603.84V_{DC}
(c) V_{LL} :260V_{rms}, f_g :36.6Hz, f_s :100kHz V_o :0V_{DC}, P_o : , V_{Link} : 500.83V_{DC}

그림 3. 보조권선 적용 S-LLC 단일전력단 AC-DC 컨버터 동작 파형

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

참고 문헌

[1] Yu-Jin Moon, Beom-Su Park, Sang-Kyu Kim, Eun-Soo Kim and Deok-Jin Lim, "3-Phase Single Stage AC-DC Converter for Small Wind Turbine System," The Transactions of Korea Institute of Power Electronics, Vol. 28, No. 1, pp. 68-75, 2 2023.
[2] ES Kim, BS Park, "Interleaved Single Stage AC-DC Converter with Auxiliary Windings," Korea Patent Pending in July 2024