

스마트그리드 리뉴어블 고효율 전력전송장치 구현 및 특성분석

김찬혁*, 노대석**

*한국폴리텍대학 전기과

**한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:redkg123@kopo.ac.kr

Implementation and Characteristic Analysis of High Efficiency Power Delivery Device for Smart Grid Renewable

Chan-Hyeok Kim*, Dae-Seok Rho**

*Dept. of Electrical Engineering, Korea Polytechnics

**Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 온실가스와 에너지 부족 문제를 해결하기 위하여, 태양광발전과 풍력발전 등의 신재생에너지전원 사업이 정부 주도하에 활발히 추진되고 있다. 그러나 신재생에너지전원이 연계된 배전계통은 기존의 단방향의 조류와 달리 양방향의 조류가 발생하고, 신재생에너지전원의 연계위치 및 고장지점에 따라 사고전류의 크기와 방향이 변하여 배전선로용 보호기기의 오·부동작 등 많은 문제점이 발생할 수 있다. 또한, 태양광발전에서 발생된 직류를 교류로 바꿔주는 전력변환장치로 인해 고조파가 배전계통에 유입되어 보호기기에 오동작 등을 일으키고, 태양광발전의 유효전력 성분에 의하여 연계지점의 역률을 저하시킬 수 있다. 한편, 기존의 태양광발전은 일부 모듈에 음영이나 환경변화로 인해 스트링의 전압이 인버터의 동작전압보다 낮아지면, 해당 스트링이 탈락되거나 최악의 경우 인버터가 탈락되어 태양광발전의 전체 운용효율이 크게 감소할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 개선하기 위하여, 기존의 수배전반에 고효율 인터페이스 장치를 조합한 태양광발전용 고효율 전력전송장치를 제안하고자 한다. 또한, 특성시험을 수행한 결과 태양광발전의 운용효율을 향상시킬 수 있어 경제적 이득을 가져올 것으로 기대된다.

1. 서론

최근, 전 세계적으로 온실가스와 에너지부족 문제를 해결하기 위하여 신재생에너지전원의 보급 사업을 적극적으로 추진하고 있다. 하지만, 신재생에너지전원이 연계된 배전계통은 기존의 단방향의 조류와 달리 양방향의 조류가 발생하고, 신재생에너지전원의 연계위치 및 고장지점에 따라 사고전류의 크기와 방향이 변하여, 배전선로용 보호기기의 오·부동작 등 많은 문제점들이 발생되고 있다. 구체적으로, 동일 뱅크의 타선로에서 지락사고 발생시, 태양광발전이 연계된 건전한 선로의 보호기기가 오동작하는 사례가 보고되고 있으며, 태양광발전이 연계된 배전계통에서 %임피던스의 병렬화(분류효과)로 인해 사고전류가 감소하여, 보호기기가 부동작하는 현상이 발생되고 있다. 또한, 태양광발전의 유효전력 성분에 의하여 연계지점의 역률이 저하될 수 있고, 신재생에너지전원용 전력변환장치에 의하여, 계통연계지점의 전력품질이 저하되는 문제점이 발생되고 있다. 즉, 신재생에너지전원에서 생산된 DC전력을 AC전력으로 변환하는 인버터는 비선형적인 특성을 가지고 있어, 출력 전류에 고조파를 발생시키기 때문에 계통에 연계된 전기기기의 성능에 악영향을 미치고, 보호

기기의 오동작을 유발시킬 수 있다. 따라서, 신재생에너지전원의 연계에 따른 보호기기의 오·부동작과 전력품질 개선을 위한 대책이 필요한 실정이다. 한편, 기존의 태양광발전은 일부 모듈에 음영이나 환경변화(일사량, 온도, 습도 등)로 인해 스트링의 전압이 인버터의 동작전압보다 낮아지면, 해당 스트링이 탈락되거나 최악의 경우 인버터가 탈락되어 태양광발전의 전체 운용효율이 크게 감소할 가능성이 있다.

따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 개선하기 위하여, 기존의 수배전반에 고효율 인터페이스 장치를 조합한 태양광발전용 고효율 전력전송장치를 제안하고자 한다.

2. 고효율 전력전송장치 구현

고효율 전력전송장치는 그림 1과 같이 양방향 보호협조 제어장치와 전력품질 제어장치, 고효율 태양광발전 제어장치로 구성한다. 구체적으로는 보호기기의 오·부동작을 방지하는 양방향 보호협조 제어장치와 태양광발전 연계시 역률 및 고조파를 개선하는 전력품질 제어장치, 그리고 태양광발전의 성능 및 운용효율 향상시키는 고효율 태양광발전 제어장치로 구성된다. 한편, 양방향 보호협조 제어장치의 NGR 장치는 연

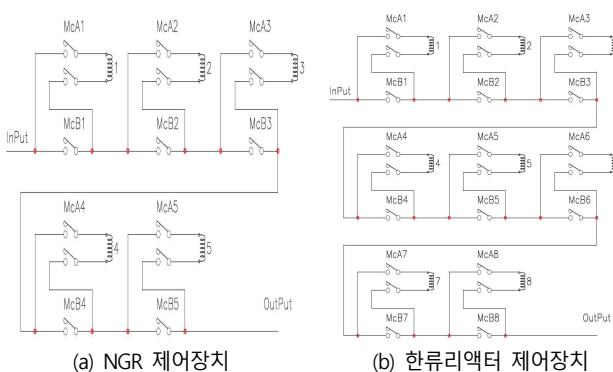
계용변압기의 접지선에 삽입해야 하며, 한류리액터 장치는 연계용변압기의 1차측 각상에 설치한다. 또한, 전력품질 제어 장치인 SVC와 고조파 필터는 고효율 태양광발전 제어장치와 연계용변압기 사이에 설치한다. 그리고 고효율 태양광발전 제어장치는 전력품질 제어장치에 후단에 설치하며, 스트링별로 DC/DC 전압 레귤레이터를 설치하도록 한다.



[그림 1] 고효율 전력전송장치의 구성도

2.1 양방향 보호협조 제어장치

양방향 보호협조 제어장치는 기존에 사용되고 있는 단일 값(저항 또는 리액터)만을 가진 사고전류 제한장치와 달리 직·병렬 탭으로 구성하여, 사고전류 크기를 적절한 값으로 제한하여 보호기기의 오·부동작 현상을 방지할 수 있도록 구현하였다. 이 장치는 NGR과 한류리액터 제어장치로 구성되며, 배전계통의 변경(부하절체나 배전선로 증설), 신재생에너지 전원의 연계지점, 신재생에너지전원의 용량변경, 사고지점 등의 다양한 요인에 따라 그림 2와 같이 저항과 리액터의 크기를 정적하게 조정이 가능하도록 MC를 조합하여 다양한 값을 조절할 수 있도록 구현하였다.



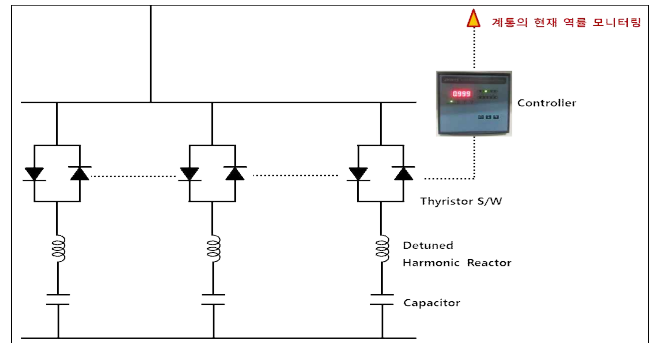
[그림 2] 양방향 보호협조 제어장치 개념도

2.2 전력품질 제어장치

2.2.1 SVC(Static Var Compensator)

태양광발전의 유효전력 성분에 의하여 계통연계지점의 역률을 저하시킬 수 있다. 특히, 역률은 계통에서 전력의 품질과

계통의 안정성을 유지하는데 중요한 요소이다. 한전의 연계 기준에 따르면, 분산전원의 연계점에서 역률은 0.9 이상으로 운영하도록 제한하고 있기 때문에 태양광발전 운용자는 연계점 역률을 0.9 이상으로 유지하도록 운영하는 동시에 수익을 최대화하여야 한다. 따라서, 본 논문에서는 역률저하 현상을 방지하기 위하여, 계통의 현재 역률을 모니터링하여 설정된 역률값에 따라 자동으로 조절할 수 있으며, 1[kVA] 단위로 30[kVA]까지 무효전력을 투입하여 역률이 개선될 수 있도록 구현하였다.



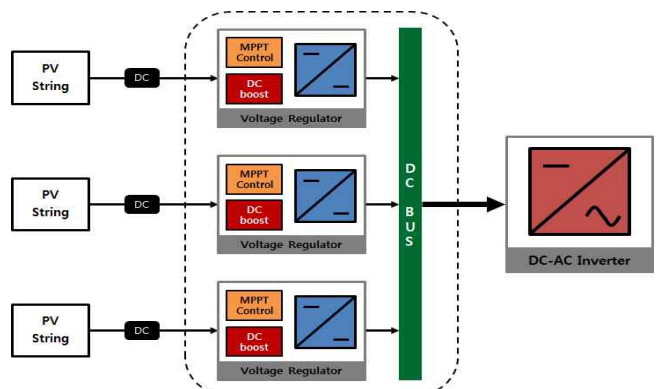
[그림 3] SVC 구성도

2.2.2 고조파 필터

태양광발전의 간헐적인 출력변동에 따라 발생하는 고조파를 개선하기 위해 고조파 필터를 설계하였다. 여기서, 고조파 필터는 특정차수의 고조파를 감소시킬 수 있도록 R, L, C로 구성된 단일동조 필터로 구현하였다.

2.3 고효율 태양광발전 제어장치

구름 또는 건물로 인하여 일부 태양광 모듈에 음영이 발생하여도 태양광발전 전체 운용효율이 저하되는 문제점을 개선하기 위하여, 스트링별로 DC/DC 전압 레귤레이터를 설치하여 MPPT 제어와 정전압 제어기능을 수행할 수 있도록 하며, 계통연계 인버터는 조류의 방향만 결정하도록 그림 4와 같이 구성하였다.



[그림 4] 고효율 태양광발전 제어장치 구성도

3. 특성시험 및 분석

3.1 양방향 보호협조 제어장치

양방향 보호협조 제어장치의 도입 용량에 따른 영상전류의 저감효과를 분석하기 위해서, 부하 불평형에 의한 영상전류를 발생시켜 지락사고전류를 모의하였다. 여기서, 부하 불평형 조건은 표 1과 같이, B상, C상에 각각 1,500[W]의 부하를 설정하고, A상 지락사고를 상정하여 A상의 부하를 가변시켜 N상에 영상전류를 발생시키도록 구성하였다.

[표 1] 부하 불평형 시뮬레이션 조건

	A상 부하	B상 부하	C상 부하	부하 불평형율
Case I	3,000	1,500	1,500	75[%]
Case II	6,000	1,500	1,500	150[%]

상기의 조건으로 부하 불평형에 따른 사고전류 특성시험을 수행한 결과, 표 2, 표 3과 같이 양방향 보호협조(NGR, 한류 리액터) 용량의 증가에 따라 영상전류는 선형적으로 감소하였다. 즉, 태양광발전이 도입된 배전계통에서 지락사고가 발생할 경우, 양방향 보호협조가 지락(영상)전류를 감소시켜 보호기기의 오동작을 방지시킬 수 있다. 또한, 태양광발전의 도입용량이 변화하는 경우에도, 다단의 탭으로 구성된 NGR과 한류리액터의 탭을 적절하게 선정하여 보호기기의 오동작을 방지할 수 있다. 따라서, 양방향 보호협조 제어장치가 보호기기의 오동작에 의한 태양광발전의 출력손실을 줄일 수 있어, 전체적으로 태양광발전의 운용효율을 향상시킬 수 있다.

[표 2] NGR의 도입용량에 따른 영상전류 및 감소율

불평형율 용량	75[%]		150[%]	
	영상전류[A]	감소율[%]	영상전류[A]	감소율[%]
0[Ω]	6.52	0	23.65	0
1[Ω]	6.36	2.5	22.61	4.4
3[Ω]	6.07	6.9	20.94	11.5
7[Ω]	5.53	15.2	18.05	23.7
15[Ω]	4.67	28.4	14.09	40.4

[표 3] 한류리액터R의 도입용량에 따른 영상전류 및 감소율

불평형율 용량	75[%]		150[%]	
	영상전류[A]	감소율[%]	영상전류[A]	감소율[%]
0[Ω]	6.65	0	23.56	0
0.1[Ω]	6.64	0.2	23.45	0.5
0.3[Ω]	6.62	0.5	23.35	0.9
0.7[Ω]	6.59	0.9	23.24	1.4
1.5[Ω]	6.56	1.4	23.03	2.2

3.2 전력품질 보호협조 제어장치

3.2.1 SVC(Static Var Compensator)

태양광발전에 따른 역률 특성을 분석하기 위해 태양광발전의 출력용량에 따라 역률 저하현상을 모의하였고, SVC의 용량을 순차적으로 변경하였다. 상기의 시험조건에서 SVC를 1[kVA] 단위로 5[kVA]까지 투입한 결과, 표 4와 같이 역률이 점차적으로 개선되었다. 그러나, 태양광발전의 출력용량에 따라 SVC 용량을 2[kVA] 이상 투입한 경우, 계통 연계지점의 역률이 지상에서 진상으로 바뀌어 “분산전원 배전계통 연계 기술기준”에 위배하게 되어, SVC의 용량을 과도하게 투입하면 문제점이 발생하였다. 한편, SVC의 자동모드를 사용하여 역률 특성 시험을 수행한 결과, 태양광발전 용량에 따라 계통 역률이 변하더라도 SVC가 자동적으로 적절한 용량을 선정하여, 역률을 개선할 수 있다.

[표 4] 태양광발전에 따른 역률분석

		투입 전	투입 후				
			1[kVA]	2[kVA]	3[kVA]	4[kVA]	5[kVA]
역률	PV 연계전	0.90 (지상)	0.95 (지상)	1.00 (지상)	0.99 (진상)	0.94 (진상)	0.87 (진상)
	PV 0.9[kW]	0.85 (지상)	0.92 (지상)	0.99 (지상)	0.98 (진상)	0.90 (진상)	0.81 (진상)
	PV 1.8[kW]	0.75 (지상)	0.86 (지상)	0.99 (지상)	0.95 (진상)	0.85 (진상)	0.72 (진상)
	PV 2.7[kW]	0.68 (지상)	0.82 (지상)	0.97 (지상)	0.90 (진상)	0.72 (진상)	0.58 (진상)

3.2.2 고조파 필터

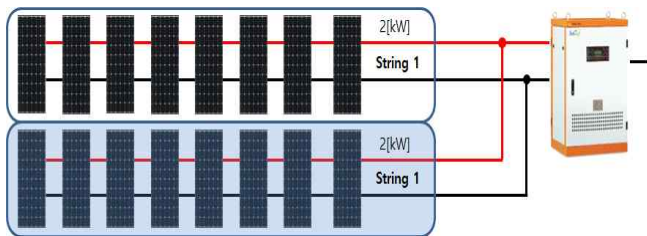
태양광발전 연계용량에 따른 고조파 특성을 분석하였다. 여기서, 시험 조건은 태양광발전의 용량을 1.5[kW], 2[kW], 2.5[kW]로 상정하고, 고조파 필터를 차수별(3차, 5차, 7차)로 투입하면서 고조파 특성을 분석하였다. 상기의 조건으로 특성시험을 수행한 결과, 표 5와 같이 태양광발전이 정격용량으로 운전할 경우 고조파 왜형률(THD)이 약 3.5[%] 정도이지만, 태양광발전이 정격용량에서 벗어나 운전할 경우에는 고조파 왜형률이 5[%] 이상으로 증가하였다. 또한, 고조파 필터를 차수별(3차, 5차, 7차)로 투입한 결과, 고조파가 점차적으로 개선되었다. 이때, 고조파 왜형률(THD)은 “분산전원 배전계통 연계기술기준”에서 제시된 허용치인 5[%] 이내로 보상을 확인하였다.

[표 5] 태양광발전제에 따른 고조파 분석

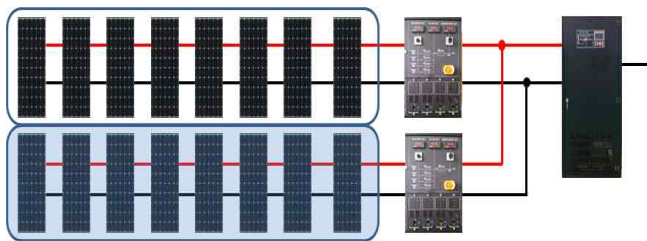
	PV 출력 (1.5[kW])	PV 출력 (2[kW])	PV 출력 (2.5[kW])
필터 투입 전 고조파[%]	5.07	4.36	3.47
3 고조파 필터 투입 후 고조파[%]	4.55	3.74	3.14
3. 5 고조파 필터 투입 후 고조파[%]	4.32	3.46	2.83
3, 5, 7 고조파 필터 투입 후 고조파[%]	3.98	3.15	2.52

3.3 고효율 태양광발전 제어장치

기존의 태양광발전 제어방식과 제안한 태양광발전 제어방식의 운용효율 특성을 비교, 분석하기 위하여, 그림 5과 같이 테스트 베드를 구축하였다. 태양광 스트링은 정격출력 250[W]급 모듈 8개를 직렬로 연결하여 2[kW]급으로 구성하였으며, 이 스트링 2개를 병렬로 연결하여 4[kW]급 태양광발전시스템을 구현하였다. 한편, 태양광 모듈에 발생된 음영이 태양광발전 운용효율에 미치는 특성을 분석하기 위하여, 태양광 모듈에 차단막(폼보드)을 사용하여 음영 효과를 모의하였다. 즉, 모듈의 일부분만 음영(셀 20개)을 발생시키거나 또는 모듈 전체에 음영(셀 60개)을 발생시켰다.



(a) 기존의 태양광발전 제어방식



(b) 제안한 태양광발전 제어방식

[그림 5] 제어방식에 따른 태양광발전 테스트 베드 구성도

기존의 제어방식과 제안한 제어방식에 의한 태양광발전의 운용효율 특성을 비교하기 위하여, 음영이 발생된 모듈의 개수를 파라메타로 하여, 태양광발전의 출력특성을 분석하면 표 6과 같다. 즉, 태양광 모듈 1개(셀 60개)에 음영이 발생된 경우, 기존의 제어방식에서는 음영이 발생하지 않는 경우에 대하여 스트링의 운용효율이 0[%]로 되지만, 제안한 제어방

식에서는 스트링의 운용효율이 12.4[%] 정도만이 감소되었다. 또한, 태양광 모듈 2개(셀 120개)에 음영이 발생된 경우, 기존의 제어방식에서는 태양광 모듈 1개에 음영이 발생한 경우와 동일하지만, 제안한 방식에서는 스트링의 운용효율이 25[%] 정도가 감소되었다. 따라서, 제안한 태양광발전 제어방식이 기존의 제어방식에 비해, 상당한 폭으로 운용효율이 개선되었다.

[표 6] 제어방식에 따른 태양광발전 운용효율

		기존 제어장치	제안한 제어장치
음영 발생전	태양광 출력	1,842[W]	1,843[W]
음영 발생후	모듈 $\frac{1}{3}$ 개	태양광 출력	1,755[W]
		운용효율	95.3[%]
	모듈 $\frac{2}{3}$ 개	태양광 출력	1,675[W]
		운용효율	90.9[%]
	모듈 1개	태양광 출력	0[W]
		운용효율	0[%]
	모듈 $1\frac{1}{3}$ 개	태양광 출력	0[W]
		운용효율	0[%]
	모듈 $1\frac{2}{3}$ 개	태양광 출력	0[W]
		운용효율	0[%]
	모듈 2개	태양광 출력	0[W]
		운용효율	0[%]

4. 결론

본 논문에서 제안한 고효율 전력전송장치를 태양광발전설비에 설치하여 장기간 운영할 경우, 보호기기의 오·부동작과 전력품질에 의한 출력손실, 태양광 모듈의 음영 및 환경변화에 의한 출력감소 등을 줄일 수 있다. 이를 통해 태양광발전의 운용효율을 향상시켜 경제적 이득을 가져올 것으로 기대된다. 또한, 국내의 탈원전 및 재생에너지 3020에 따른 정부정책과 국외의 신재생에너지 보급 활성화 추세에 따라 태양광발전 시장이 지속적으로 증가하고 있어, 본 논문에서 제안한 태양광발전 운용효율 향상을 위한 고효율 전력전송장치의 보급 전망은 매우 밝을 것으로 기대된다. 이로 인해 고효율 전력전송장치는 국내·외 시장에 적지 않은 파급효과를 가져와 태양광발전 산업 확대에 기여할 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] 김찬혁외 3 “태양광발전의 운용효율 향상을 위한 DC/DC 전압 레귤레이터의 구현 및 특성분석”, 한국산학기술학회논문지, 제18권 제4호, pp.201-208, 4월, 2017년