

선로임피던스에 의한 태양광 인버터의 동작특성에 관한 연구

(Research about movement character of PV Inverter by distribution line impedance)

정점수* · 윤기갑*

(Jum-Soo Jeong · Ki-Kab Yoon)

요약 저압배전계통에 연결되는 분산전원 중 태양광 인버터의 역 조류가 발생하는 상태에서 계통의 비정상 상태 즉 순간전압강하, 순간전압 상승, 고조파 등에 의해서 다양한 응답특성이 나타난다. 비정상 상태의 계통상황에 의해 인버터가 정지되고 그로인한 피해는 고스란히 발전사업자의 경제적 손실로 이어지고 또한 기기 소손 등의 설비 피해가 나타난다. 이러한 현상을 재현하고 분석하여 대책을 제시하고자 고창시험센터 내 분산전원 실증시험장의 실증시험설비를 이용하여 그 현상을 시험하였다. 본 논문에서는 저항과 리액터로 구성된 선로 임피던스 장치를 가변 하여 저압 배전계통의 선종, 규격, 공장 등을 구현하고 삼상 유도전동기 통해 회전기 부하를 연결한 상태에서 태양광 인버터의 계통 병입 전/후의 나타나는 전압 변동 특성에 대해 시험 및 분석과정을 거쳐 나타나는 문제점의 해결책을 제시하고자 한다.

This paper operate with variable line impedance equipment consist of resister and reactor, when connect to 3phase induce motor present solve problem appear grid interconnection before/after about voltage transient of pv inverter through test and analysis solve problem.

1. 서론

다양한 분산전원의 개별 또는 집단의 수요가 계속해서 증가하고 이에 따라 전력계통과의 연계가 활발히 이루어지면서 분산형 전원을 전력계통에 연계할 때 필요한 기술요건을 충분히 검토하여 전기품질 및 공급신뢰도 면에서 기존의 계통이나 타 수용가에 공급해야 한다.

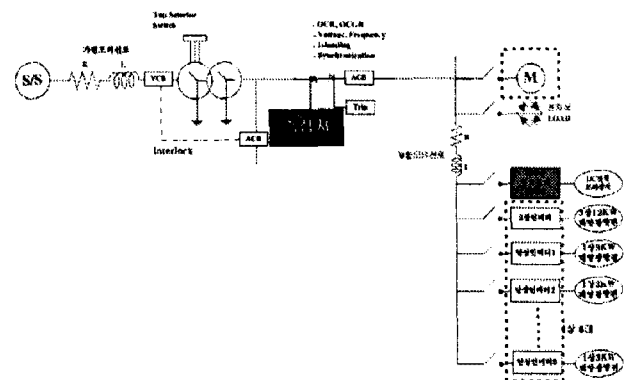
본 논문에서는 계통연계에 따라 구체적으로 고려해야 할 기술적인 검토 사항 중 저압배전계통에서 발생하는 분산전원이 배전계통 연계 전/후의 배전계통에 미치는 전압변동 특성에 대한 실증시험 결과에 대해 언급하고 AC 전원 모의 장치를 이용하여 배전계통에서 나타나는 비정상 상태로서 Voltage Sag/Swell에 의해 IEEE 1547계통 연계형 인버터의 국제 기준에 대해 실증시험을 통해 그 결과를 확인하였으며 대책에 대해 기술하고 있다.

또한 전압변동 특성 시험을 위해 저압배전계통의 선종, 규격, 공장 등의 선로임피던스를 가변 할 수 있는 시험설비와 회전기 부하에 의해 다양한 지점의 선로 전압 강하 형태에서 분산전원이 계통에 병입 될 때 계통연계 지점의 전압변동 특성에 대한 현상을 분석하고 그 해결책을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1. 시험회로 구성

그림 1 시험회로 구성도
Fig 1 Diagram test line



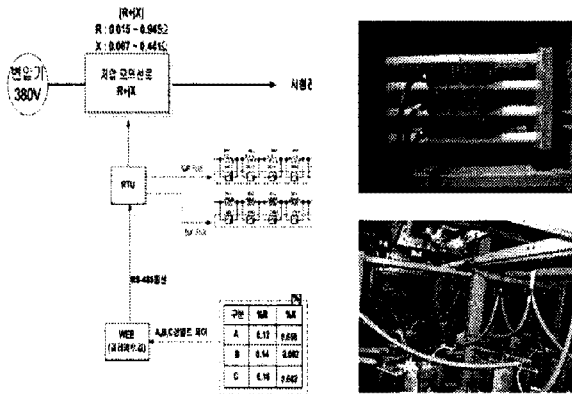
본 시험을 위해 위의 그림 1과 같이 고창전력시험센터 내 154kV 변전소에서 인출된 배전선로에서 1km 떨어진 지점의 분산전원 실증시험장 내부 22.9kV/220V 수배전반 변압기를 통해서 저압 배전계통 모의하기 위해 저항과 리액터로 구성된 선로 임피던스 장치가 구성되어 있고 부하설비로는 30kW 용량의 삼상 유도전동기가 설치되어있고 병렬회로에 실제 태양광 모듈에서 DC전원을 공급받

는 태양광 인버터가 단상 3kW 6대, 삼상 12kW 1대가 설치되어 있고 또한, 연료전지 인버터의 특성 시험을 위해 DC Power Supply를 설치하여 DC전원을 공급할 수 있도록 구성되어 있다. 측정장비 설치위치는 선로임피던스 전/후단에 각각 1대씩 설치하여 전압, 전류, 유효전력, 무효전력, 역률, 고조파 등의 전력품질을 측정하였다.

2.2. 시험설비 개요

그림 2 선로 임피던스 가변장치

Fig 2 Variable equipment line impedance



위 그림 2의 선로 임피던스 가변장치는 저항과 리액터로 구성되어 저항은 최대 0.945Ω까지 조절이 가능하고 리액터는 최대 0.441Ω까지 조절이 가능하도록 구성되어 있다. 시험장치는 저압배전선로의 선종, 규격, 단위길이 당 최대 1km의 저압배전선로를 구현할 수 있도록 구성되어 있다. 저항은 Kanthal 또는 동등이상의 저항체를 사용하였고 선로의 저항은 표2-1과 같이 0.15Ω ~ 0.945Ω에 해당하는 저항 값을 가지며 저항을 직렬로 적절히 조합하면 0.15Ω 단위로, 0.15Ω ~ 0.945Ω까지의 특성 시험이 가능하도록 구성되었다.

표 1 선로길이에 따른 저항 값

Table 1 Resistance each distribution line

구분	조작스위치 M/C						
		1배	2배	4배	8배	16배	32배
정상분	%	1039	2078	4155	8310	16620	33241
	Ω	0.015	0.03	0.06	0.12	0.24	0.48

본 시험장치에 사용되는 리액터는 공심형 리액터로서 경동선을 사용하여 원통형으로 제작되었으

며 %임피던스 값은 표2-2와 같이 0.007Ω ~ 0.441Ω에 해당하는 인덕턴스 값을 갖도록 하였고, 리액터를 직렬로 적절히 조합하면 0.007Ω 단위로, 0.007Ω ~ 0.441Ω까지의 선로 특성시험이 가능하도록 구성되었다.

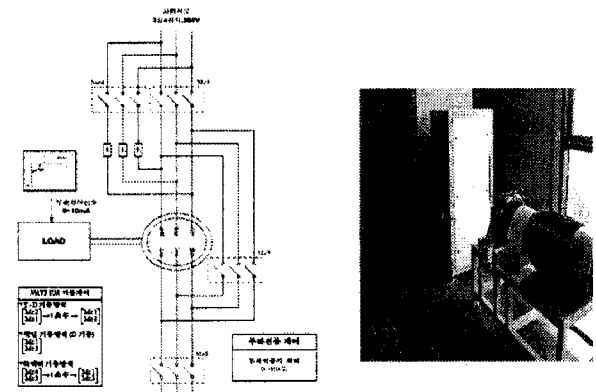
표 2 선로길이에 따른 리액턴스 값

Table 2 Reactance each distribution line

구분	조작스위치 M/C						
		1배	2배	4배	8배	16배	32배
정상분	%	485	970	1939	3878	7756	15512
	Ω	0.007	0.014	0.028	0.056	0.112	0.224

그림 3 모터 부하장치

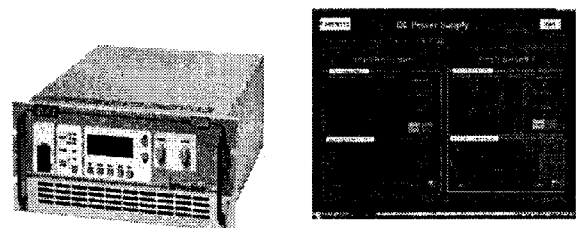
Fig 3 Load equipment induce motor



분산전원 특성을 시험하기 위해 연료전지 인버터를 사용하였고 인버터에 정격 600V-25A의 DC전원을 공급하기 위해 DC Power Supply를 이용하여 최대 출력 15kW 용량까지 시험할 수 있도록 회로를 구성하였다.

그림 4 DC 전원 공급장치

Fig 4 DC Power Supply

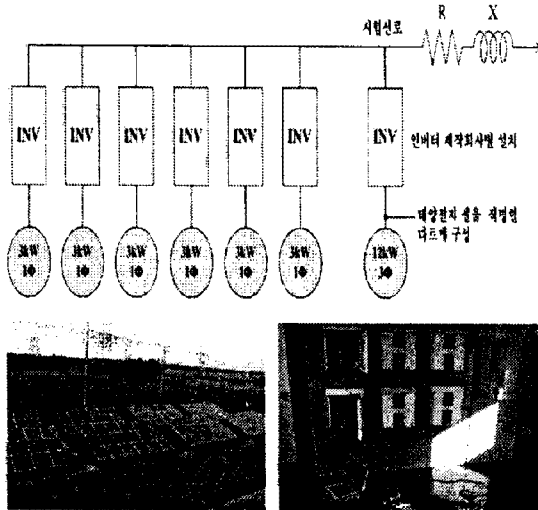


본 시험을 위해서 사용되는 부하설비는 3상 Y-Δ운전방식의 30kW 유도전동기이며 Air cooling

Eddy-current 타입의 최대 토크 637Nm의 브레이크를 이용하였고 컨트롤러는 회전속도, 토크, 출력등을 제어, 계측, 감시할 수 있는 시스템으로 구성되었다.

태양광 발전설비는 그림 5와 같이 실제 태양광 발전설비를 구성했고 태양전지 모듈은 단결정 실리콘으로서 각각의 모듈에는 역전류 방지용 다이오드가 있고 최대 180W, 24V, 7.71A의 전기적 특성을 가지고 있다. 계통연계형 인버터는 DC/AC 인버터로서 제어방식은 최대 출력점 제어(MPPT) 형태이고 인버터 정격입력은 DC 336V이고 출력전압 안정도는 $\pm 5\%$ 이고 효율은 최대 93.4%이다. 보호기능으로는 정격전압의 $\pm 10\%$ 이내의 과전압 보호, 정격주파수의 $\pm 2\text{Hz}$ 이내, 계통연계 전압 $\pm 10\%$ 이내, 계통주파수 $\pm 2\text{Hz}$ 이내의 보호기능을 가지고 있다.

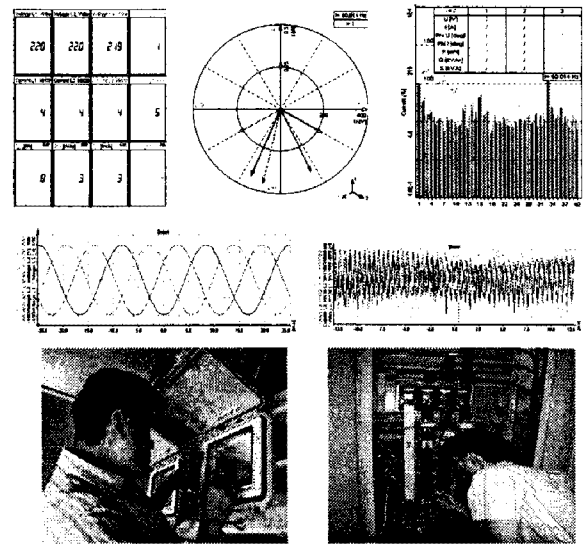
그림 5 태양광 발전설비
Fig 5 PV solar equipment



본 실증시험의 측정 포인트는 저압모의선로장치의 전단과 후단으로서 선로 임피던스를 가변하기 전의 전압변동 특성과 가변한 후의 전압변동 특성을 비교하기 위해 측정 포인트를 선정했다. 측정 장비로는 그림 6과 같이 전력품질 분석기로서 각 상별 전압 4채널, 전류 4채널, 유효전력, 무효전력, 역률, 고조파(최대 40차수) 등의 다양한 전력품질을 측정할 수 있는 PQ Analyser를 사용하였고 현재 풍력 및 태양광 발전설비 등 분산전원 제작업체 및 성능인증기관에서 사용 중인 장비로서 전력품질 측정 장비로서는 가장 많이 사용 중이다.

Sample rate는 10000s/sec condition trigger는 always fast 모드로 측정하였다.

그림 6 전력품질 분석기
Fig 6 PQ Analyser



2.3. 시험 조건

2.3.1 OW 38mm² 500m 조건의 경우

본 시험을 위해 저압모의선로 임피던스 조건은 저압배전선로 공급방식은 3상 4선식이고 선종은 OW 38mm², 선로 공장은 놓어촌 선로 최대 500m(10경간)로서 선로 임피던스 $R + jX$ 는 $0.425 + j0.1817$ 로 설정했다.

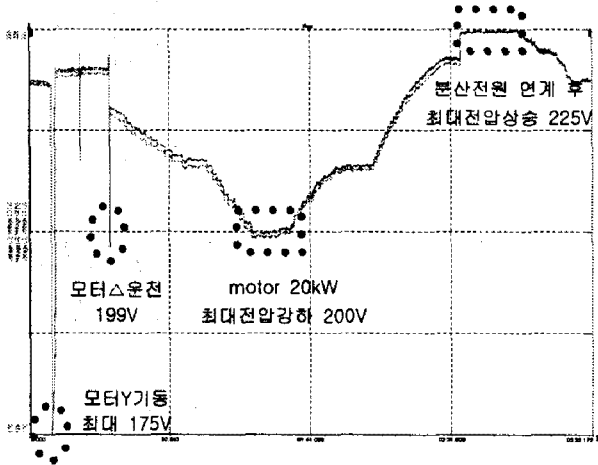
모터부하장치는 Y기동 후 Δ 로 자동전체 후 모터 부하량을 20kW까지 서서히 증가시킨 상태에서 전압변동 특성을 측정하고 동일 상태에서 DC Power supply를 이용하여 연료전지 인버터의 입력부분에 DC를 공급하고 인버터를 통하여 발전량을 최대 10kW까지 서서히 증가 시키면서 전압변동 특성을 측정하여 잠시 후 Motor를 정지시키고 분산전원을 정지시키는 방법으로 시험조건을 구성했다.

2.3.2 시험 결과

임피던스 전단 측의 전압변동시험 결과는 저압선로 임피던스의 영향을 전혀 받지 않기 때문에 초기 전압은 219V이고, Motor Y 기동 시 기동전류에 의해 216V로 3V로 전압강하를 보인 후 초기 전압으로 복귀되고, Δ 전체 운전 시 217V로 2V 전압강하를 나타내고 초기전압으로 복귀되었으며 Motor 부하를 20kW 까지 서서히 증가 시킨 결과 217V로서 2V의 전압강하가 발생되고 동일 상태에서 분산전원(PV, FC)을 계통에 병입 후 발전량을

10kW 까지 서서히 증가시킨 결과 전압은 219V로서 2V의 전압상승 효과를 나타냈다.

그림 7 임피던스 후단 측 전압변동 특성 파형
Fig 7 Voltage trend end side impedance



임피던스 후단 측의 전압변동시험 결과는 그림 7과 같이 선로 임피던스 투입 전 219V이고 $R + jX$ 를 $0.425 + j0.1817$ 로 투입한 후 초기 전압은 부하가 연결되지 않은 상태에서 전압이므로 선로임피던스 전단 측과 동일한 219V이고 Motor Y 기동 시 기동전류에 의해 175V로 44V로 전압강하를 보인 후 초기전압으로 복귀되고, Δ 절체 운전 시 199V로 20V의 전압강하를 나타내고 초기전압으로

그림 8 분산전원 연계 전/후 등가회로 및 벡터 해석
Fig 8 DG Interconnection before/after equivalent circuit and vector analysis

구분	분산전원 연계 전	분산전원 연계 후
등가 회로		
파형		
벡터 해석		

복귀되었으며 Motor 부하를 20kW 까지 서서히 증가 시킨 결과 200V로서 19V의 전압강하가 발생 되고 동일 상태에서 분산전원(PV, FC)을 계통에 병입 후 발전량을 10kW까지 서서히 증가시킨 결과 전압은 225V로서 25V의 전압상승 효과를 나타 냈다.

본 실증시험의 결과를 요약하면 저압 가공배전 선로의 선종 OW 38mm², 공장 500m 지점에 분산전원이 계통에 병입 될 때 최대 25V의 전압상승 효과를 나타냈다. 경 부하 상태의 저압선로에 분산전원이 계통에 병입 될 경우 공급전압 유지범위인 220V \pm 13V를 초과하는 상태까지 이르게 된다.

따라서 이와 같은 공급여건 상태에서 분산전원이 계통에 병입이 되지 않도록 분산전원 계통연계에 배전선로의 저압계통을 분리하여 적절한 부하 배치와 상위 규격의 선종으로 교체하여 선로 임피던스를 줄인 후 연계해야 한다.

그림 8은 위 실증시험선로를 등가회로로 표현한 분산전원 연계 전/후 전압변동 특성에 대한 이론적으로 해석하였으며 벡터적으로 해석한 자료이다.

2.3.3 OW 22mm² 250m 조건의 경우

본 시험을 위해 저압모의선로 임피던스 조건은 저압배전선로 공급방식은 3상 4선식이고 선종은 OW 22mm², 선로 공장은 250m(5경간) 로서 선로 임피던스 $R + jX$ 는 $0.2125 + j0.09085$ 로 설정했다.

모터부하장치는 Y기동 후 Δ 로 절체 후 부하량을 20kW까지 서서히 증가시킨 상태에서 분산전원(PV와 FC)의 발전량을 최대 12kW까지 증가 시키고 잠시 후 Motor를 정지시키고 분산전원을 정지시키는 방법으로 시험을 수행했다.

2.3.4 시험 결과

임피던스 전단 측의 전압변동시험 결과는 저압 선로 임피던스의 영향을 전혀 받지 않기 때문에 초기 전압은 220V이고, Motor Y 기동 시 기동전류에 의해 217V로 3V로 전압강하를 보인 후 초기 전압으로 복귀되고, Δ 절체 운전 시 217V로 2V 전압강하를 나타내고 초기전압으로 복귀되었으며 Motor 부하를 20kW 까지 서서히 증가 시킨 결과 219V로서 1V의 전압강하가 발생되고 동일 상태에서 분산전원(PV, FC)을 계통에 병입 후 발전량을 12kW 까지 서서히 증가시킨 결과 전압은 220V로서 1V의 전압상승 효과를 나타냈다.

임피던스 후단 측의 전압변동시험 결과는 선로

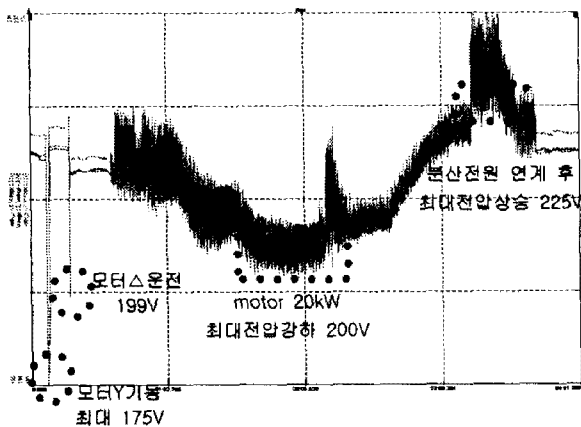
임피던스 투입 전 220V이고 $R + jX$ 를 0.2125 + j0.09085로 투입한 후 초기 전압은 부하가 연결되지 않은 상태에서 전압이므로 선로임피던스 전단측과 동일한 220V이고 Motor Y 기동 시 기동전류에 의해 195V로 25V의 전압강하를 보인 후 초기전압으로 복귀되고, Δ 절체 운전 시 203V로 17V의 전압강하를 나타내고 초기전압으로 복귀되었으며 Motor 부하를 20kW 까지 서서히 증가시킨 결과 207V로서 13V의 전압강하가 발생되고 동일 상태에서 분산전원(PV, FC)을 계통에 병입 후 발전량을 12kW까지 서서히 증가시킨 결과 전압은 236V로서 29V의 전압상승 효과를 나타냈다.

본 실증시험의 결과를 요약하면 그림 9와 같이 저압 가공배전선로의 선종 OW 22mm, 공장 250m 지점에 분산전원이 계통에 병입 될 때 최대 29V의 전압상승 현상이 나타났다.

경 부하 상태의 저압선로에 분산전원이 계통에 병입 될 경우 공급전압 유지범위인 220V \pm 13V를 초과하는 상태까지 이르게 된다. 따라서 이와 같은 공급여건 내에서 분산전원이 계통 병입 되지 않도록 분산전원 계통연계 전에 배전선로의 저압계통을 분리하여 선로 공장을 감소시켜 선로 임피던스 크기를 줄이고, 불평형 부하 배치를 제거하고 부하의 평형상태를 유지해서 전압강하 요소를 사전에 제거해야 한다.

추가 대비책으로는 상위 규격의 선종으로 교체하여 선로 임피던스의 크기를 줄여 규정전압 이내로 유지하는 것이 무엇보다 중요하다.

그림 9 임피던스 후단 측 전압변동 특성 파형
Fig 9 Voltage trend end side impedance



3. 결론

3상 4선식 OW 38mm 규격의 저압 가공 배전선이 500m 떨어진 지점에 Y- Δ 운전형식의 20kW 모터부하를 연결하고 병렬로 분산전원이 배전계통에 연계 되는 경우 전압변동 특성을 시험한 결과 선로임피던스의 영향을 받지 않는 임피던스 전단측의 전압변화량은 1V 이내로 분산전원의 영향을 받지 않으나 임피던스 후단 측의 전압변화량은 임피던스에 의해 전압은 최대 200V 까지 전압강하가 발생하였고 10kW의 분산전원이 배전계통에 병입된 후 최대 225V로서 25V의 전압상승이 나타났다. 이후 2회의 시험에서도 유사한 형태의 전압상승 현상을 시험을 통해 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 분산전원이 선로임피던스에 의해 전압강하가 발생했을 때 전압상승 현상이 나타나는 것을 본 실증시험을 통해 확인하였고 이러한 현상을 해결하기 위해서는 저압 배전선로의 임피던스를 줄이는 것이 그 방법이 되는데 임피던스를 감소시키기 위해서는 첫째 저압선로의 공장을 줄이는 방법과 둘째 임피던스가 적은 상위 규격의 선종을 선택해야만 한다.

참 고 문 헌

- [1] "분산전원 계통연계 실증시험 및 기술지침 수립 연구", 한국 전력공사 전력연구원, 07전력연-단1000, 2007, 2.
- [2] "분산형 전원을 고려한 저압계통 분석 시스템", 동북전력, 2004.

◇ 저자소개 ◇

정 점 수(Soo-Jum Jeong)



- 2008.2 : 충남대학원 전기공학과(공학석사)
- 1997.2 ~ 2006.6 : 한전 충남사업본부
- 2006년 6월 ~ 현재 : 한전 전력연구원
- <관심분야>: 전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질 해석

윤 기 갑(Gi-Gab Yoon)



- 1983.2 : 한양대학교 전기공학과(공학사)
- 1988.8 : 한양대학교대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1999.2 : 한양대학교대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1990년 ~ 현재 : 한전 전력연구원
- <관심분야> : 전력계통, 배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석