

단독운전검출기법의 불검출 영역에 대한 비교 고찰

이 기옥, 소 정훈*, 정 영석*, 유 권중*, 최 주엽, 정 승기, 최 의
 광운대학교, *한국에너지기술연구원

Evaluation of the Non-Detection Zone of Anti-Islanding Methods

K.O Lee, J.H So*, Y.S Jung*, G.J Yu*, J.Y Choi, S.G Jung, I. Choy
 Kwangwoon University, *Korea Institute of Energy Research

Abstract - 계통연계형 태양광발전 시스템의 확대 보급에 따라 단독운전 검출기법의 검출 성능에 대한 검증의 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 단독운전검출기법의 대표적인 능동적 검출기법인 무효전력변동기법(reactive power variation method)과 주파수 쉬프트기법(active frequency drift method)을 IEEE Std 929-2000에서 명시된 단독운전검출 시험방법을 이용하여 단독운전검출기법의 성능 및 불검출 영역(non-detection zone)에 대하여 비교 분석하였다.

1. 서 론

전력수요의 증가에 따른 에너지원의 안정적 공급과 지구환경문제에의 대응으로서 무한정·무공해의 대체에너지원인 태양에너지의 이용기술에 대한 관심이 증대됨에 따라 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 범정부 차원의 태양광발전시스템의 연구개발과 보급정책이 추진되고 있으며, 국내에서도 대체에너지 이용보급촉진 및 보급정책을 통해서 photovoltaic(PV)시스템의 이용보급이 증가될 것이라 판단할 수 있다.

이러한 배경으로 향후 PV시스템을 포함한 소규모 분산전원의 확대보급에 따라 특정지역에서는 분산전원에 의한 전력생산량이 증대될 것이다. 이 결과로 단방향의 전력조류만을 허용하던 기존 배전계통에 대한 보호, 운용 및 관리 등에 있어서 배전계통이 사고에 따른 차단 동작 또는 보수작업에 의한 전력공급이 중단되었을 경우에도 분산전원장치가 계속해서 무하의 전력과 균형을 이루어 운전하여 발전전력을 배전계통으로 공급하게 되는 현상 즉, 단독운전에 따른 기기손상, 전력품질의 저하 및 인명피해 등의 많은 문제가 발생할 가능성이 크게 될 것이다. 따라서 전력계통의 변화에 따라서 단독운전을 분산전원장치에서 신속히 검출하여 분산전원장치의 운전을 정지하여야 한다. 그리고 더 나아가 배전계통의 사고방지 및 분산형 전원장치의 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위한 단독운전검출기법의 성능평가에 대한 필요성이 대두되고 있다.^[1]

따라서 본 논문에서는 단독운전검출기법의 대표적인 능동적 검출기법인 무효전력변동(reactive power variation : RPV)기법과 주파수 쉬프트(active frequency drift : AFD)기법을 전력전자용 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 이용하여 단독운전검출기법의 성능에 대한 장·단점을 비교 분석하여 불검출 영역(non-detection zone)에 대하여 살펴보았다.

2. 단독운전검출기법

단독운전검출기법의 모의실험에 대한 가정은 아래와 같다. 첫째, 태양광 발전용 PCS(power conditioning system)는 3kW급 단상 저압 계통연계형 인버터이다. 둘째, 단독운전검출기법은 인버터가 담당한다. 셋째, 인버터의 입력전원은 이상적인 정전압원이다.

넷째, 계통은 이상적인 전압원이다.

위의 조건에서 단독운전검출기법의 모의실험은 전력전자용 모의실험 프로그램인 PSIM을 이용하였고, 단독운전검출기법별 부하설정은 IEEE Std 929-2000에 명시된 방법을 이용하였다.^[2] 또한, 모의실험에서 사용한 위상 동기화(phase-locked loop) 기법은 삼상 인버터 시스템에서 사용되는 위상동기화 기법을 phase-shift filter를 이용하여 단상 인버터에서 사용할 수 있도록 변형한 위상동기화 기법을 채택하였다.^[3]

2.1 무효전력변동(Reactive-Power Variation)기법

태양광발전용 PCS에서 계통의 사고 및 정전에 의한 단독운전의 검출은 계통의 전압과 주파수의 변화를 감지하여 이상 발생시 PCS를 정지시키는 수동적인 방법이 기본적으로 사용된다. 단독운전검출기법 중 능동적인 기법인 RPV기법은 무효전력을 계통으로 주기적으로 주입하여 단독운전 발생시 주파수의 변동을 발생시키고 이 변동을 검출하여 PCS를 정지시키는 기법으로 제어되는 그림 1과 같다.

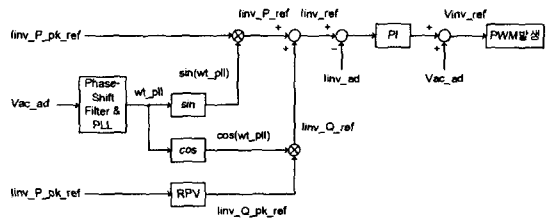


그림 1 RPV기법 제어도

그림 2는 RPV기법에서 PCS의 출력전류의 지령값은 유효전류지령값과 무효전류지령값으로 이루어지는데, 그림 2는 유효전류지령값의 5%인 무효전류지령값을 500ms 주기로 변동시킨 예이다.

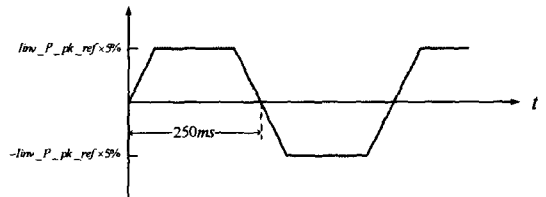


그림 2 RPV기법의 무효전력변동

2.2 주파수 쉬프트(Active Frequency Drift)기법

AFD기법은 PCS가 계통으로 주입하는 전류의 주파수를 가공하여 단독운전 발생시 계통전압 주파수가 변동하면 이를 이용하여 단독운전을 검출하는 방법이다. AFD 기법의 제어는 그림 3과 같이 하였다. 그림 3에서 FS block은 그림 4와 같이 출력전류의 지령값을 가공하는

역할을 한다. 그림 4에서 보는 바와 같이 계통전압의 반주기동안 출력전류가 0이 되는 시간(t_z)을 계통전압의 반주기($T_{Vutil}/2$)를 이용하여 이를 chopping fraction (cf)으로 정의할 수 있다. 이 cf 를 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

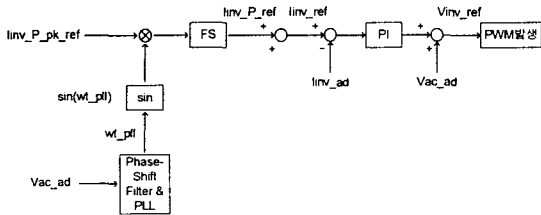


그림 3 AFD기법 제어도

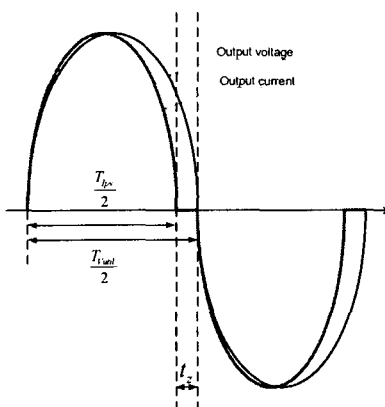


그림 4 AFD기법의 출력전류파형

$$cf = \frac{2t_z}{T_{Vutil}} \quad (1)$$

그림 4와 같은 AFD기법은 PCS가 계통으로 주입하는 전류 중 유효전력전달에 기여하는 성분은 출력전류의 기본파전류인데, 이 기본파 출력전류의 위상이 계통전압의 위상과 정확하게 일치하지 않아 발생하는 역률 저하 및 전력품질 저하 등의 문제점이 발생한다.

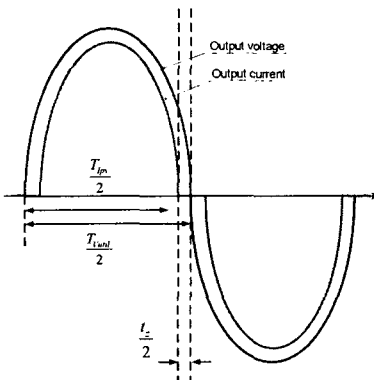


그림 5 모의실험에 적용된 AFD기법의 출력전류파형

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 단독운전검출성능 모의실험에서는 그림 5와 같이 출력전류가 0으로 떨어지는 시간(t_z)을 반으로 나눈 시간($t_z/2$)만큼 출력전류의

위상이 낮도록 제한한 AFD기법을 적용하였다.^[4]

3. 모의실험

PCS의 구성은 그림 6과 같이 단상 H-bridge, L-C filter, dynamic-link library(DLL)인 PWM controller로 구성하였고 switching은 삼각파 비교방식을 사용하였다.

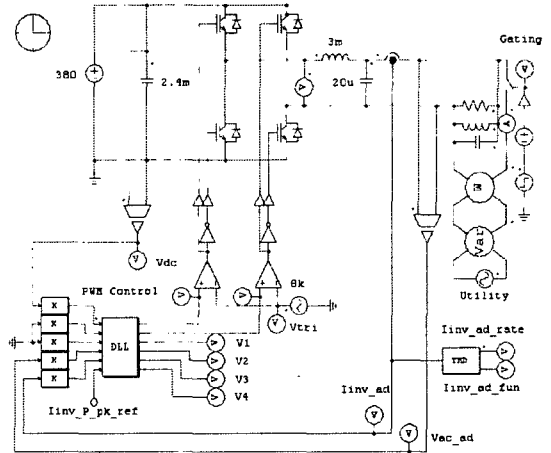


그림 6 PCS의 PSIM 회로도

3.1 RPV기법

부하설정은 최악의 설정으로 인버터의 출력전력과 부하의 소비전력이 일치하여 계통에서 부하로 들어가는 전력이 0이 되도록 설정된 값을 사용하였고, 단독운전 발생시점도 계통전압이 zero-crossing하는 시점에서 단독운전이 발생하도록 하였다. RPV기법에 대한 모의실험에 사용한 부하의 조건은 아래와 같다.^[2]

$$\begin{aligned} P_{inv} &= 3.13643[kW], & P_{p-inverter} &= 37.2815[Var], \\ P_{q-L} &= 2.5 \times P_{in} = 7.841075[kVar], \\ L_{load} &= 94.541351[mH], \\ P_{q-c} &= 7.803794[kVar], & C_{load} &= 74.78[\mu F], \\ R_{load} &= 15.43155[\Omega] \end{aligned}$$

투입하는 무효전류의 양에 따른 PCS의 전력품질을 나타내는 역률과 무효전력/유효전력의 비율 그림 7에 나타내었다. 이 그림 7에서 역률을 고려한다면 최대로 투입할 수 있는 무효전류의 양은 PCS의 역률이 0.95 이상이 되는 유효전류의 약 45%까지 가능하다. 이 조건에서 출력전력 중 유효전력의 32.9%를 무효전력이 차지하게 된다.

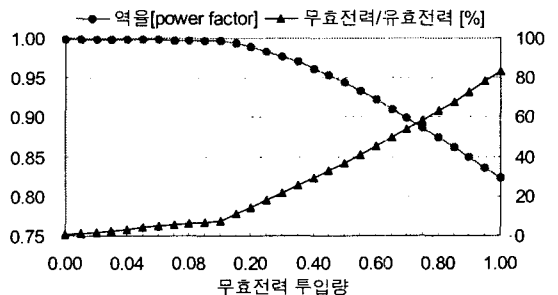


그림 7 무효전류 투입량에 대한 역률 및 출력전력

그림 8은 무효전류의 투입량에 따른 계통전압주파수의 변화를 나타낸다.

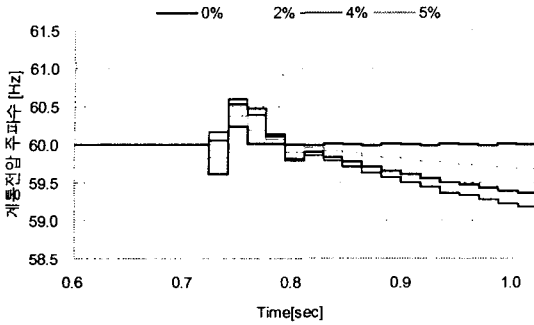


그림 8 무효전류 투입량에 따른 계통전압 주파수변화

위의 그림 8에서 단독운전이 발생하였을 때 무효전류의 투입량이 최소한 유효전류의 5% 이상이 되어야 단독운전검출을 할 수 있다. 이로써 단독운전검출기법 중 RPV기법을 적용하는 태양광용 PCS는 유효전류의 최소 5%에서 최대 45%의 무효전류를 투입할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 AFD기법

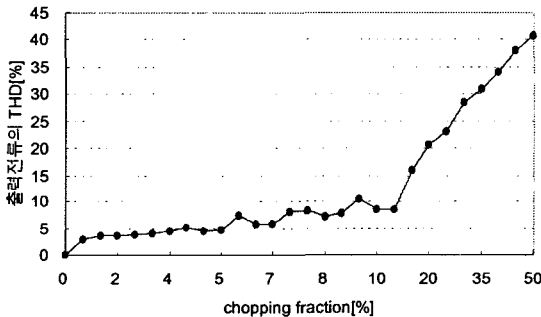


그림 9 chopping fraction에 의한 고조파왜곡률(THD)

AFD기법을 적용한 단독운전검출 모의실험에 사용된 부하설정은 아래와 같다.^[2]

$$P_{inv} = 3.14679 [kW], \quad P_{p-inverter} = 22.9487 [Var],$$

$$P_{q-L} = 2.5 \times P_{in} = 7.866975 [kVar],$$

$$L_{load} = 94.853633 [mH],$$

$$P_{q-C} = 7.844027 [kVar], \quad C_{load} = 74.396 [\mu F],$$

$$R_{load} = 15.38075 [\Omega]$$

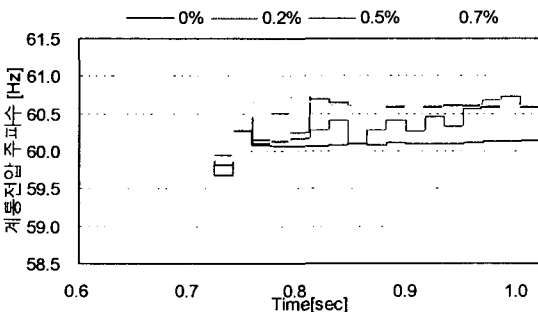


그림 10 Chopping fraction에 따른 계통전압 주파수변화

그림 9는 cf 의 비율에 의한 출력전류의 고조파왜곡률(THD)을 나타내었다. 그림 9에서 태양광발전용 PCS의 고조파왜곡률에 대한 규격에 의거하여 고조파왜곡률이 5% 이내이어야 함으로 cf 가 최대 5%까지 사용될 수 있음을 보여준다. 즉, AFD기법을 태양광용 PCS에 적용하려면 cf 는 5%를 넘지 않도록 하여야 한다.

그림 10은 단독운전발생시 cf 의 비율에 대한 계통전압의 주파수 변동에 대하여 나타낸 그래프이다. 그림 10에서 살펴보면 cf 는 최소 0.5% 이상이 되면 태양광용 PCS가 계통전압의 주파수를 변하게 하여 단독운전검출이 가능한 수준으로 주파수를 변하게 하는 역할을 할 수 있다. 이로써 AFD기법을 적용할 태양광용 PCS에서는 cf 의 비율을 0.5%~5% 이내에서 변동할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통의 고장 및 사고에 의한 단독운전이 발생하였을 때 태양광용 PCS에서 이를 감지하여 신속히 전력변환 동작을 정지하여 지역부하인 기기 손상방지 및 사고에 대한 안전성확보를 위하여 태양광용 PCS의 기능에 필수기법으로 포함되어야 할 단독운전검출기법 중에서 능동적 검출기법의 대표적 기법인 무효전력변동(reactive power variation)기법과 주파수 쉬프트(active frequency drift)기법의 단독운전검출성능에 대하여 각각 절대적인 역할을 하는 무효전류의 투입량과 chopping fraction(cf)의 비율에 대한 경계조건을 전력전자용 모의실험 프로그램인 PSIM을 이용하여 밝히었다.

RPV기법에서 무효전류는 유효전류의 5%~45%까지 변동이 가능하다. 즉, 단독운전을 검출하기 어려운 최악의 L-C병렬공진 부하 조건에서도 무효전류를 유효전류의 5%정도만 투입하여도 단독운전을 검출할 수 있으며 태양광용 PCS가 생산하는 전력품질을 고려하여도 45%까지 투입이 가능함을 밝히었다. AFD기법에서는 cf 의 비율을 0.5%~5% 이내에서 변동이 가능함을 밝힘으로써, 만약 각 기법별로 예상할 수 없는 부하조건에서 단독운전이 발생하여도 태양광용 PCS가 단독운전을 검출할 수 있을 것으로 예상된다.

향후 무한한 에너지원인 태양에너지를 이용하여 태양광용 PCS가 생산하는 전력을 고품질로 유지하면서 단독운전발생시 이를 신속히 검출하는 요소요건과 태양광용 PCS의 시시각각 변하는 출력전력이 단독운전을 검출하지 못하는 영역에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구를 수행할 계획이다.

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구지원사업 (R01-2001-000-00313-0-2003)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

[참 고 문 헌]

- [1] 최추업 외 5인, "태양광발전 시스템의 계통연계 보호를 위한 단독운전검출기법의 기술개발에 관한 연구", 산업자원부지원 최종보고서, 2001 N-PV03 P 01, 2003년 5월
- [2] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std 929 2000, 3 April 2000
- [3] 박용성, "단상 계통 연계형 PCS의 위상동기화 기법", 충북대학교 전기공학과 석사학위청구논문, pp.17~20, 2004
- [4] M.E.Ropp, M.Begovic, A.Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention" Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 14, Issue 3, Sept. pp. 810~816, 1999