

Seamless Transfer를 위한 계통연계형 인버터의 간접전류 제어기법

유태식*, 최세완*, 김효성**

서울산업대학교 제어계측공학과*, 공주대학교 전기전자공학부**

Indirect Control of Utility Interactive Inverter for Seamless Transfer

Taesik Yu*, Sewan Choi*, Hyosung Kim**

Seoul National University of Technology*, Kongju National University**

ABSTRACT

Distributed generation (DG) systems fall in islanding operation when they still in operation even when the main grid is out of electric power. Islanding operation is further classified into intentional islanding and unintentional islanding operations. In intentional islanding operation, the DG backs up critical loads while it separates from the main grid on islanding detection. Intentional islanding operation increases utilization of the DG system during the islanding operation. This paper proposes reasonable inverter topology and its control algorithm for seamless transfer of DG systems in intentional islanding operation.

Key words: Distributed generation, Intentional islanding operation, Seamless transfer, Indirect current control.

1. 서 론

현재 사용되고 있는 에너지원의 대부분을 차지하는 화석연료는 지구온난화를 일으키는 이산화탄소 및 각종 공해물질을 배출하고 있다. 최근 기후변화 협약을 바탕으로 채택된 교토의정서가 발효됨에 따라 신·재생에너지를 활용할 수 있는 기술의 중요성이 점차 증대되고 있다. 이러한 신·재생에너지원은 그 규모가 1kW급의 소형에서부터 수백MW급에 이르기까지 다양하며 분산발전의 형태로 계통에 연계된다.

분산발전시스템에서 주전원계통에 정전이 발생하는 경우에도 분산발전시스템이 주전원으로부터 분리되지 않고 계속 동작하는 상황을 단독운전 (Islanding operation)이라고 한다.

일반적으로 단독운전상태가 검출되면 즉시 인버

터의 동작을 정지시켜서 주전원계통과 분산발전시스템과의 연결을 해제하여야 한다. 단독운전방지 (anti-islanding) 기법은 이러한 비의도적인 단독운전을 방지하는 것을 의미하며, 이 분야의 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다^[1~3].

한편 의도적인 단독운전은 분산발전시스템에 비상부하 등의 전용부하가 접속되어 있어서, 주전원에 고장이 발생하더라도 비상전용부하에는 지속적인 전력을 공급하고자 하는 경우이다. 이같이 의도적인 단독운전의 상황에서는 단독운전상태가 검출되더라도 분산발전시스템은 주요부하에 끊임없는 안정된 전압을 공급하는 한편 주전원계통으로부터는 접속을 차단하여 안전을 확보하여야 한다.

의도적인 단독운전 발생시 인버터는 운전모드의 전환에 따른 출력전압의 과도현상을 최소화하는 기술이 필수적이다. 그런데 기존의 직접전류 제어방식은 계통연계 운전시는 전류제어모드로 또한 단독운전시는 전압제어모드로 동작하게 된다. 따라서 계통연계운전중에 주전원계통에 고장이 발생하는 경우 의도적인 단독운전을 지속하기 위하여 인버터는 전류원모드에서 전압원으로 동작모드를 전환해야만 하므로 인버터전압이 매우 불안정해질 수 있다. 특히 새그나 스웰 또는 순시정전 등과 같이 시간적으로 급격한 사고시 운전모드의 전환이 신속히 이루어지지 못하게 되면서 과도문제가 더욱 심각하게 나타날 것이다. 더욱이, 단독운전검출 알고리즘의 불검출영역(NDZ)과 통신지연 등의 요인에 의하여 주전원계통의 고장이 분산발전시스템에서 즉시에 인식이 되지 못하게 된다면 상당한 시간동안 주요부하의 전압이 심각한 과도상태에 놓일 수 있게 된다.

본 논문에서는 의도적인 단독운전을 고려한 계통연계형 인버터의 제어알고리즘에 관하여 연구한다. 주전원계통의 사고가 분산발전시스템에서 늦게 감지되더라도 주요부하의 전압에 과도문제가 발생하

지 않는 새로운 인버터 토플로지를 제시하고 그에 따른 인버터제어 알고리즘을 구현한다. 시뮬레이션에 의해 제안된 인버터의 특성을 검증하여 타당성을 확보한다.

2. 제안하는 간접전류제어방식

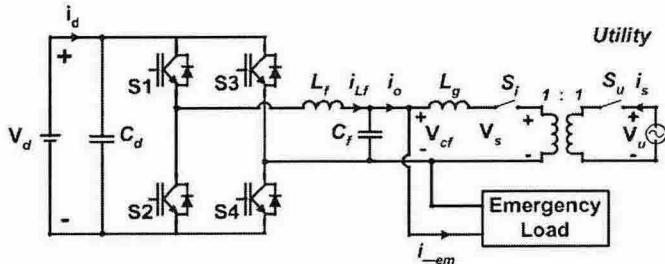


그림 1 제안한 계통연계 인버터를 사용한 단상 분산발전시스템

그림1에 제안한 방식의 인버터 토플로지를 보인다. 주전원계통이 정상일 때에 보호스위치 S_u 및 계통연계스위치 S_i 는 ON 상태에 있다. 이때 제안된 계통연계형 인버터는 전압제어모드로 운전되면서 라인인덕터에 가해지는 전압을 제어함으로써 계통에 주입되는 전류 I_o 를 조정한다. 계통연계형 인버터에는 정격의 25%의 비상부하가 상시 연결되어 있으므로, 계통에 주입할 수 있는 최대 전력은 정격의 75%까지이다.

주전원계통에 고장이 발생하면 주전원계통의 보호스위치인 S_u 는 곧바로 차단되면서 약 1/4사이클 이내에 사고를 계통연계형 인버터에게 알린다. 계통연계형 인버터는 사고를 인식하면 전류주입을 중단하고 계통연계스위치 S_i 를 차단하는 한편, 25%의 비상부하에 끊임없는 전력을 공급하며 의도적인 단독운전을 한다.

표1에 제안된 분산발전시스템의 전기적 사양을 보인다. 제안된 시스템은 실험실에서 제작하여 검증해 볼 수 있도록 1kW급의 규모로 하였으나 대

용량의 경우에도 토플로지 및 제어알고리즘의 적용이 가능하다.

인버터의 교류출력측 필터로 LCL구조의 필터를 사용한다. 기존의 전류제어방식의 토플로지에서는 인버터에 L형 교류필터를 접속하여 전류제어를 하고, 전류리플성분이 계통으로 유입되는 것을 억제하기 위하여 CL형 교류필터를 사용한다.^[4,5]

이와 달리, 본 논문에서 제안한 간접전류제어방식의 토플로지는 LC형 교류필터를 기본으로 동작하여 필터커패시터 양단의 전압을 제어함으로써, 계통쪽의 라인인덕터 L_g 양단에 걸리는 전압을 제어하여 간접적으로 계통에 주입되는 전류를 조정한다.^[6]

표 1 제안된 분산발전시스템의 전기적 사양

정격출력전력(P)	1kW
공청전원전압(V)	240V
공청전원주파수(f)	50Hz
스위칭주파수(f_{sw})	15kHz
LCL 필터	$L_f=6.11\text{mH}$, $C_f=1.84\mu\text{F}$, $L_g=18.3\text{mH}$

직접전류제어방식은 계통연계시에 주입전류의 제어특성은 우수하지만, 서론에서 언급한 바와 같이 의도적인 단독운전의 경우에 전류제어모드에서 전압제어모드로 전환하여야 하므로 과도문제가 예상된다.

그림2에 본 논문에서 제안하는 간접전류제어알고리즘을 적용한 제어시스템 블록도를 보인다. 외부루프에서 계통주입전류 I_o 를 제어하고, 내부루프에서는 인버터출력단 LC필터의 커패시터전압(이하 인버터 출력단전압으로 표기함) V_C 를 제어한다.

인버터출력단전압은 LC필터에 의한 공진의 가능성 있다. 인버터 출력단전압의 공진을 억제하기 위하여 고주파필터(HPF)를 사용한 피드포워드 제

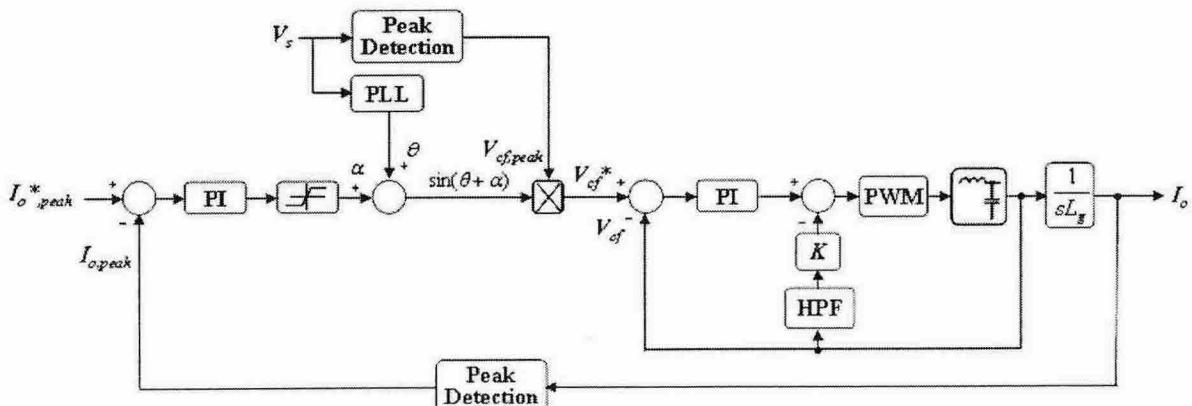


그림 2 제안된 간접전류제어방식의 제어시스템 블록도

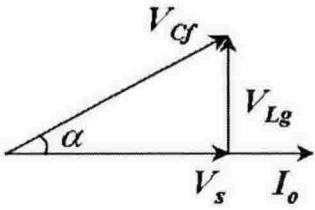


그림 3 제어알고리즘 벡터도

어를 추가하였다^[7].

간접전류제어 알고리즘에서는 계통연계운전시, 라인인덕터 L_g 에 인가되는 전압을 제어함으로써 간접적으로 주입전류를 조정한다. 주전원계통에 주입하고자하는 유효전력이 P 라고 하면, 라인인덕터 L_g 를 통하여 주입되어야 할 전류 I_o 는 (1)과 같이 계산되어질 수 있다.

$$I_o = \frac{P}{V} \quad (1)$$

이때 라인인덕터 L_g 에 가해지는 전압은 (2)와 같이 유도된다.

$$V_{Lg} = 2\pi f \times L_g \times I_o \quad (2)$$

라인인덕터에 가해지는전압 V_{Lg} 와 계통전압 V_s 그리고 인버터 출력단전압 V_{Cf} 사이에는 그림3과 같은 벡터관계가 형성된다.

따라서 주전원계통에 I_o 의 전류를 주입하기 위하여 필요한 인버터 출력단전압의 크기 및 위상은 다음 식과 같이 계산된다.

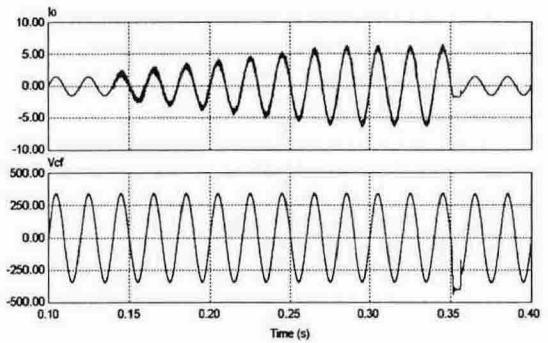
$$V_{Cf} = \sqrt{V_s^2 + V_{Lg}^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_{Lg}}{\sqrt{V_s^2 + V_{Lg}^2}} \quad (4)$$

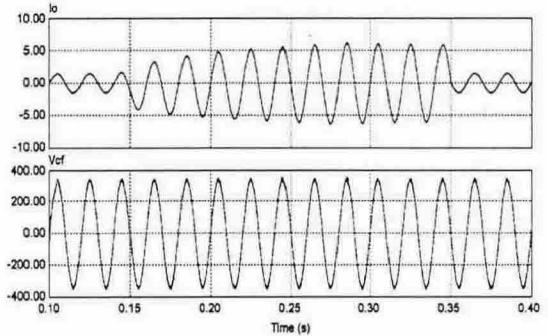
식(3)과 (4)는 인버터를 제어하기 위한 기준값이 된다. 인버터 출력단전압의 크기는 정밀히 제어할 필요는 없으며 피드포워드제어로 간단히 구현할 수 있다. 그러나 위상각 α 는 매우 정밀한 제어가 요구된다. 본 논문에서는 그림2에 보인 것처럼 주입전류의 오차를 위상각의 제어변수로 택하여 PI 제어기로 피드백제어를 하였다.

3. 타당성 검토

제안된 제어방식의 계통연계운전에 대한 타당성을 검토하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다.

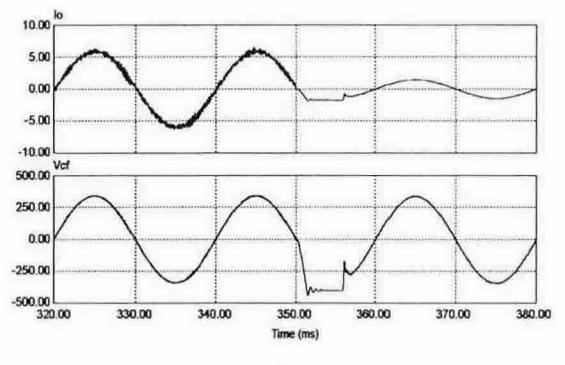


a)

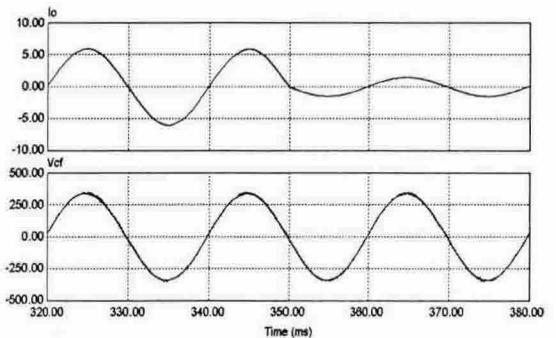


b)

그림 4 시뮬레이션 시나리오에 따른 각 제어방식에서의 인버터 출력전류 및 전압파형; a)직접전류제어방식, b)제안한 간접전류제어방식



a)



b)

그림 5 주전원에 고장이 발생한 경우의 확대 파형; a)직접전류제어방식, b)제안한 간접전류제어방식

- ① 초기에 주전원계통이 정상적인 상태(보호스위치 S_u 는 ON)에서 계통연계스위치 S_i 를 ON시켜서 계통연계운전을 시작한다. 이때 전류주입은 하지 않고, 다만 비상부하에 25%의 전력을 공급하고 있다.
- ② 0.14초의 시점부터 서서히 75%의 전력을 계통에 주입한다.
- ③ 0.35초의 시점에 전원측에 고장이 발생된다. 이때 보호스위치 S_u 는 즉시 차단되지만 계통연계인버터는 1/4 사이클이 지난 후에 고장을 인식한다고 가정한다.
- ④ 0.355초에 인버터는 주전원계통의 사고를 인지하여 S_i 를 차단하고 25%의 비상부하에 끊임없는 전력을 공급하면서 의도적인 단독운전으로 전환한다.

그림4에는 시뮬레이션 시나리오에 따른 각 제어방식의 인버터 출력전류 및 전압을 보인다. 시뮬레이션 과정에서 알 수 있는 바와 같이 직접전류제어방식이나 제안된 간접전류제어방식 모두 계통연계시 주입전류를 잘 제어하고 있다. 그러나 주전원계통에 고장이 발생하여 이를 감지하고 의도적인 단독운전으로 전환하는 0.35초 이후의 과정을 보면, 제안된 간접전류제어방식의 동작특성이 우수함을 알 수 있다.

그림5는 주전원에 고장이 발생한 시점을 확대한 과정이다. 그림5a)의 직접전류제어방식의 경우 주전원계통에 고장이 발생한 상황을 인버터가 인식하기까지의 지연시간동안 인버터의 출력전압과 전류가 제어 불능의 상태에 빠져서 회로의 조건에 따라 비상부하에 걸리는 전압과 전류가 비정상적인 형태로 결정되는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 그림5b)의 제안된 간접전류제어방식의 경우 과도기간 중에도 비상부하에 걸리는 전압과 전류는 아주 정상적인 것을 볼 수 있다.

이상의 시뮬레이션 결과를 볼 때 제안된 간접전류제어방식은, 의도적인 단독운전이 발생한 상황에서 단독운전의 검출에 지연이 발생되어도 비상부하에 끊임없는 안정된 전압을 공급할 수 있음이 검증되었다. 또한 각각 1세트의 전압센서와 전류센서만에 의하여 우수한 제어특성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은, 의도적인 단독운전이 발생한 경우 주요부하에 인가되는 전압이 끊임없이 안정되게 공급될 수 있도록, 새로운 인버터 토폴로지 및 제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 조사하였다. 제안된 방법은 인버터가 항상 전압모드로만 안정하게 동작하므로, 주전원에 고장이 발생한 경우에 주요부하단 전압을 안정하게 유지할 수 있었다. 제안된 간접전류제어방법은 계통에 주입하는 전력을 전영역에서 안정되게 조정할 수 있으며, 직접전류제어방식에 비하여 정상상태 특성과 과도상태 특성의 우수함이 입증되

었다. 또한 부하전류 외란에 따른 제어의 강인함을 보였다. 결론적으로 제안된 방법은 의도적인 단독운전을 하는 분산발전시스템에 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

이 논문은 전력선행기술재원의 “신·재생 에너지 발전의 계통연계 기초기술개발연구”(R-2004-D-125)에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J.Stevens, R.Bonn, J.Ginn, S.Gonzalez, G.Kern, "Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-interconnected Photovoltaic Systems," Sandia National Laboratories report SAND2000-1939, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, August 2000.
- [2] R.M.Hudson, T.Thome, F.Mekanik, M.R.Behnke, S.Gonzalez, J.Ginn, "Implementation and Testing of Anti-islanding Algorithm for IEEE 929-2000 Compliance of Single Phase Photovoltaic Inverters," Records on 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp.1414-1419, May 2002.
- [3] C.Jerapurtra, P.N.Enjeti, I.H.Hwang, "Development of A Robust Anti-Islanding Algorithm for Utility Interconnection of Distributed Fuel Cell Power Generation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.19, no.5, pp.1163-1170, Sept. 2004.
- [4] M.Liserre, F.Blaabjerg, S.Hansen, "Design and Control of An LCL Filter Based Active Rectifier," IEEE Trans. on Ind. App., vol.38, no.2, pp.299-307, Sept/Oct. 2001.
- [5] T.C.Y.Wang, Z.Ye, G.Sinha, X.Yuan, "Output Filter Design for a Grid-interconnected Three-Phase Inverter," Conference Records on PESC'03, vol.2, pp.779-784, June 2003.
- [6] Hyosung Kim, Seung-Ki Sul, "The Behavior of Filter Inductor Current on Controlling Filter Capacitor Voltage of Output LC Filters for PWM Inverters," Conference Records on ICPE 2004-Pusan, CD Rom, October 2004.
- [7] A.Nabae, H.Nakano, Y.Okamura, "A novel control strategy of the inverter with sinusoidal voltage and current outputs," Conference Records on PESC'94, vol.1, pp.154-159, June 1994.