

단상 계통연계형 인버터의 영 전압 사고 위상에 따른 PLL 동적 특성 분석

이 태일, 이 경수

한국산업기술대학교 에너지·전기공학과

Analysis of PLL Dynamic Characteristics according to Zero Voltage Conditions of Single-phase Grid-connected Inverter

Taeil Lee, Kyungsoo Lee

Department of Energy and Electrical Engineering, Korea Polytechnic University

ABSTRACT

태양광발전과 풍력발전으로 대표되는 분산형 전원이 계통에 연계됨에 따라 계통 사고 발생 시에 계통연계형 인버터에 대한 각국의 계통 규정(Grid code)이 더욱 엄격해 지고 있다. 최근 국외 계통 규정에서는 저 전압 사고뿐만 아니라 영 전압 사고 시에 인버터가 일정 시간 계통 연계를 유지하며 무효전류 출력 기법을 통해 계통 복구를 지원할 것을 요구하고 있다. 계통 사고 시, 사고 전압 잔존량에 따라 무효전류를 정확하게 출력하기 위해 인버터의 PLL(Phase Locked Loop) 제어는 중요하다. 그러나 이러한 PLL 제어의 동적 특성은 계통 사고 순간의 전압 강하 및 사고 위상에 따라 영향을 받게 되고 영 전압 사고에서는 위상 추종이 불가능하기 때문에 복합적인 문제가 나타난다. 본 논문에서는 영 전압 사고에서 사고 위상에 따라 각각 다르게 나타나는 PLL 동적 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지 기반의 에너지원을 갖는 분산형 전원 시스템이 계통에 연계되면서 계통 사고 발생 시에 계통연계형 인버터의 대응 방법에 대한 각국의 계통 규정(Grid Code)이 대응량 인버터뿐만 아니라 소용량 인버터에도 적용되고 있다. 그로 인해 3상 계통연계형 인버터와 더불어 단상 계통연계형 인버터의 사고 대응 방법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 사고 대응 방법으로는 사고 시 인버터가 일정 시간 계통 연계를 유지하며 무효전류를 출력하여 계통 복구를 지원하는 LVRT 제어가 대표적이다. 무효전류의 출력량은 전압 강하에 따라 달라지며 정확한 무효전류 출력을 위해 계통과 시스템의 위상을 동기화시키는 PLL의 제어 성능은 중요하다. 인버터의 LVRT 제어항상을 위한 PLL 제어에 관한 연구는 이루어지고 있으나, 사고 위상에 따라 달라지는 PLL 동적 특성에 대한 분석은 진행되지 않았다.^[2]

본 논문에서는 독일의 계통연계규정을 적용하여 단상 계통연계형 인버터의 LVRT/ZVRT 제어 기법과 PLL 제어 기법에 대해 소개하며, 계통 사고 순간의 전압 강하 및 사고 위상에 대해 PLL 동적 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

2.1 독일의 LVRT 규정

그림 1는 사고 시 전압 잔존량에 따른 인버터의 동작 요구사항을 4개의 영역(A)~(D)별로 구분 지은 독일의 LVRT 규정을 나타낸다. 독일의 LVRT 규정은 동적계통지원(전압변동이 10% 이상)과 정적계통지원(전압변동이 10% 미만)으로 구분된다. 그러나 본 논문에서는

전압변동이 큰, 계통 사고를 다루기 때문에 동적계통지원에 대해서만 나타냈다. 동적계통지원에 있어 전압 강하가 100% 일어나는 영 전압 시 계통연계형 인버터는 150ms 동안 계통연계를 유지해야 한다.

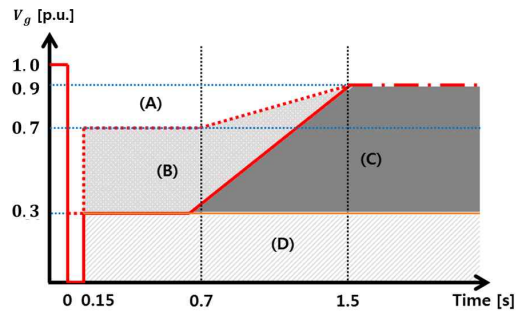


그림 1 독일의 LVRT 규정
Fig. 1 LVRT regulation in Germany

2.2 계통 전압과 무효전류 출력량의 관계

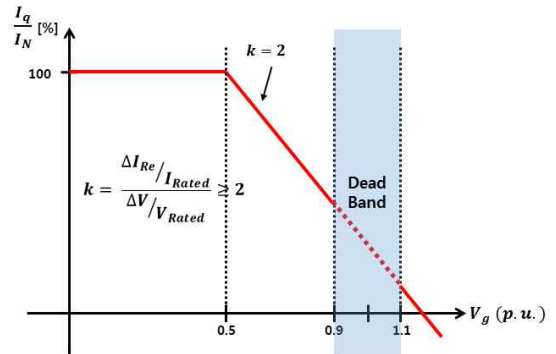


그림 2 전압 강하에 대한 무효 전류 출력 규정
Fig. 2 LVRT regulation of reactive current output

$$k = \frac{(I_q - I_{q0})/I_N}{1 - v_g}, \quad \text{when } I_q < I_N \quad (1)$$

그림 2는 계통 전압 사고 시 사고 전압이 0.1 pu. 이상 발생하는 경우 계통을 지원하기 위한 무효전류 주입량에 대한 규정을 나타낸다. k 파라미터는 국가별 계통연계규정에 따라 다르게 선정되며, 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 값인 k=2로 선정하였다. 여기서 I_q 는 무효전류, I_{q0} 는 사고 이전의 초기 무효 전류, I_N 는 정격 전류, v_g 는 계통 전압의 pu.값을 나타낸다.

3. 단상 계통연계형 인버터

3.1 단상 계통연계형 인버터 전체 구성

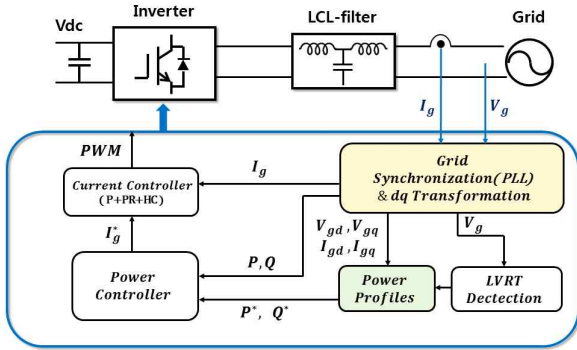


그림 3 계통연계형 단상 인버터 전체 제어블록도
Fig. 3 Single-phase grid connected inverter control block diagram

그림 3은 일반적인 계통연계형 단상 인버터의 전체 구성을 보여준다. 계통 전압과 인버터 출력전류의 위상을 동기화 시켜주는 PLL 제어, 유·무효 전력제어, 출력 전류제어로 구성된다. 전류제어는 고조파 보상과 정상 상태 오차를 없애기 위해 수식식(2)와 같은 P+PR+HC 제어기를 사용하였다. 사고 시 PLL에서 계통 전압 크기를 검출하여 Power Profile에 전달하며, Power Profile에서는 순시적인 전압 강하에 따라 유·무효전력 기준값(P^* , Q^2)을 생성함으로써 계통 지원을 할 수 있도록 하였다.

$$k_p + \frac{2k_i\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c + \omega^0} + \sum_{h=3,5,7} \frac{k_{ih}s}{s^2 + (h\omega_{3,5,7})^2} \quad (2)$$

3.2 PLL 제어 기법

계통연계형 인버터는 계통 전압과 인버터 출력 위상을 일치시키는 PLL 제어가 필요하다. 우수한 동특성의 PLL 제어를 위해 좌표변환이 필요하며 이때, 한 상의 전압만 센싱이 가능한 단상시스템에서는 90°만큼 지연된 가상 전압을 만들어 줘야 한다. 가상 전압을 생성하는 방식에 따라 PLL 제어 기법이 다양하며 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 APF(All Pass Filter)를 이용한 dq-PLL과 SOGI(Second Order Generalized Integrator)-PLL 두 가지 방법을 적용하였다.

3.2.1 APF를 이용한 dq-PLL

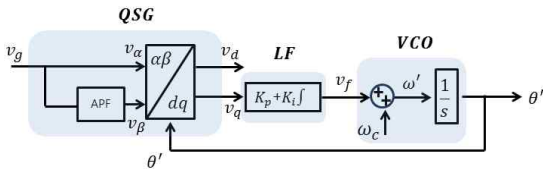


그림 4 APF를 이용한 dq-PLL 블록도
Fig. 4 dq-PLL block diagram using APF method

그림 4는 APF를 이용한 dq-PLL의 제어블록도이다. 가상 전압은 APF를 통해 생성되며 좌표변환을 거쳐 PI 제어기로 오차를 줄여주는 PLL 제어 기법이다. 기본적인 PLL 제어와는 달리 주파수 진동 없이 정확하게 추종하지만, 입력 전압의 주파수가 기준 주파수를 벗어나면 약간의 진동이 발생하는 단점이 있다.

3.2.2 SOGI-PLL

그림 5는 SOGI-PLL의 제어 블록도이다. 가상 전압을 생성하는 SOGI 기법으로 v_α , v_β 를 출력해 내고 이를 dq변환을 거쳐 v_d , v_q 로 출력한다. SOGI-QSG는 Adaptive notch filter를 기반으로 구성되어 있으며, 센싱되는 계통 주파수가 기준 주파수가 아닌 상황에서도 정확하게 v_α 의 90°만큼 지연된 v_β 를 출력하여 계통 위상을 추종한다. APF를 이용한 dq-PLL 대비 계산량이 많아지는 단점이 있다.

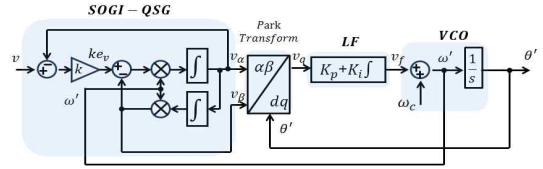


그림 5 SOGI-PLL 제어 블록도
Fig. 5 SOGI-PLL block diagram

3.3 무효전류 출력 기법

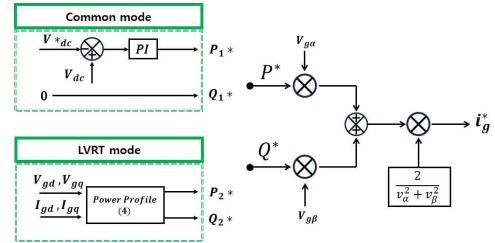


그림 6 LVRT 제어 블록도
Fig. 6 LVRT control block diagram

그림 6은 LVRT 제어 블록도를 나타낸다. 정상 상태에서는 입력전압 제어를 통해 유효전력의 기준값(P_1^*)을 출력하며 역률 1로 운전할 수 있도록 무효전력 기준값(Q_1^*)을 출력한다. 저 전압 사고 시에는 식(3), 식(4)를 적용하여 전압 강하에 따라 유효전력 기준값(P_2^*)과 무효전력 기준값(Q_2^*)을 출력한다.

$$\begin{cases} I_q = I_N \\ I_d = k(1 - v_g)I_N \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq v_g &\leq (1 - 1/k) \text{ p.u.} \\ (1 - 1/k) \text{ p.u.} \leq v_g &\leq 0.9 \text{ p.u.} \end{aligned} \quad (4)$$

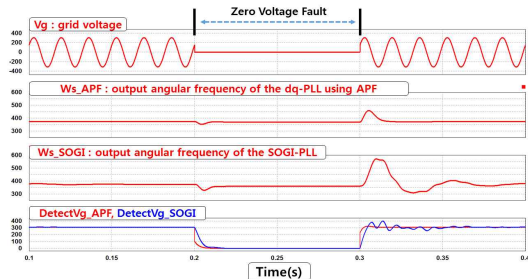
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

TABLE I
SIMULATION PARAMETERS

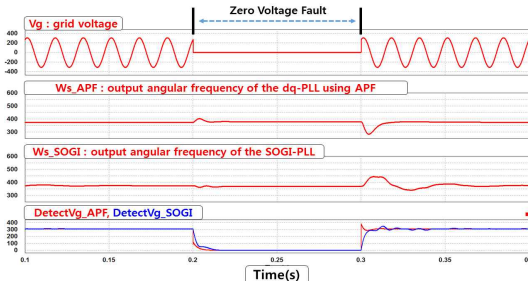
Parameter	Value	Unit
Rated output power, P_{no}	3	kW
Rated output voltage, V_g	220	V_{rms}
Grid frequency, F_{grid}	60	Hz
Rated output current, I_o	13.6	A_{rms}
Input voltage, V_{dc}	380	V_{dc}
Filter inductance, L_{inv}	0.2	mH
Filter capacitance, C_f	8.22	μF
Filter inductance, L_{grid}	84.74	μH
Switching frequency, f_{sw}	20	kHz

시뮬레이션은 PSIM 프로그램을 이용하였으며 표 1의 파라미터를 적용하여 영 전압 사고 시 사고 순간의 위상에 따라 APF를 이용한 dq-PLL과 SOGI-PLL의 제어 특성의 변화를 확인하였다.

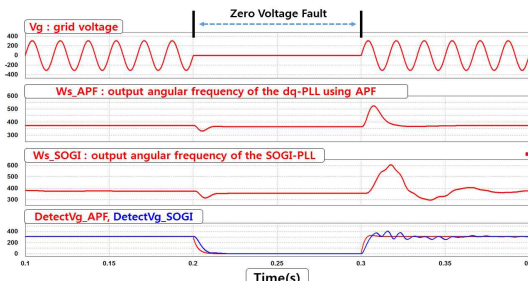
4.1 영 전압 사고 시 위상에 따른 PLL 동특성 확인



(a) 계통 사고 전압 위상 0°



(b) 계통 사고 전압 위상 45°



(c) 계통 사고 전압 위상 90°

그림 7 사고 위상에 따른 PLL 동작 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation result of PLL operation depending on phase fault

그림 7은 사고 위상에 따라 PLL의 동적 특성을 보여주는 파형이다. 0.2초에는 영 전압 사고가 시작되고 0.3초에는 사고가 복구되었을 때를 나타내었다. 여기서 W_{s_APF} , W_{s_SOGI} 는 각주파수, $detect_APF$ 와 $detect_SOGI$ 는 검출 전압 크기를 의미한다. 사고 순간(0.2초)에 0°(a), 45°(b), 90°(c)마다 사고 시작과 사고 복구 순간에 제어되는 주파수의 과도상태가 각각 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 계통 전압보다 90°의 지연된 위상을 갖는 가상 전압은 APF 및 SOGI를 통해 출력된다. 이러한 가상 전압은 사고 시 급격한 전압의 변화에 대해 정확하고 신속하게 생성되지 못하여 그림 7과 같이 사고 위상에 따라 PLL 동적 특성이 각각 다르게 나타나게 된다.

4.2 영 전압 사고 시 위상에 따른 가상 전압 확인

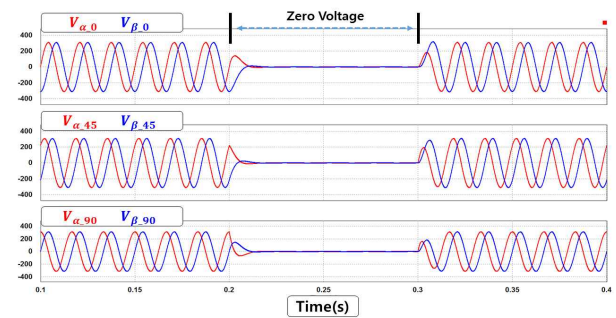
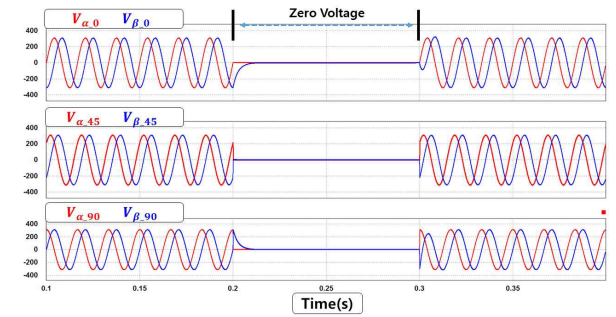


그림 8 사고 위상에 따른 v_α , v_β 시뮬레이션 결과 (APF(상), SOGI(하))
Fig. 8 Simulation result of v_α , v_β depending on phase fault

그림 8은 사고 위상이 0°, 45°, 90°일 때 생성되는 계통 전압(v_α)과 APF(상)과 SOGI(하)를 통해 생성되는 가상전압(v_β)을 나타내고 있다. 사고 위상이 45°일 때, 0°나 90° 대비 빠른 동특성을 보이고 있으며 이로 인해 그림 7(b)가 다른 사고 위상 대비 과도 특성이 가장 좋게 나타남을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 논문은 단상 계통연계형 인버터의 LVRT 제어 구성을 나타냈고 영 전압 사고 시 사고 순간의 위상에 따라 달라지는 PLL의 동적 특성에 대해 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 일반적으로 사용되는 APF를 이용한 dq-PLL과 SOGI-PLL를 대상으로 분석하였으며 사고 위상이 45°일 때 PLL이 우수한 과도특성을 보임을 확인하였다.

이 논문은 2019년도 한국전력공사의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다. (No. 2019G01491)

참고 문헌

- [1] Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez "Grid Converters For Photovoltaic and Wind Power System" John Wiley & Sons, Ltd. 2011
- [2] Anup Anurag, Yongheng Yang, Fred Blaabjerg, "Thermal Performance and Reliability Analysis of Single-Phase PV Inverters With Reactive Power Injection Outside Feed-In Operating Hours", IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS, VOL. 3, NO. 4, Dec. 2015