Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2021) 35(8) : 35～41
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2021.35.8.035 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 35-8-6

계통 연계형 인버터의 LVRT 동작 성능 분석

(Analysis of LVRT Operation Performance of Grid-connected Inverter)

조현빈* · 박종범** · 안재범* · 임승범*** · 류홍제†
(Hyun-Bin Jo · Jong-Beom Park · Jae-Beom An · Seung-Beom Lim · Hong-Je Ryoo)

Abstract

The scale of renewable power generation facilities such as wind power and solar power generation is being enlarged. Due to the increased scale of renewable power generation facilities, the system stability has been significantly affected by the increased distributed power sources, and various countries such as Germany and the United States are enacting standards to prevent deterioration of system stability. In this paper, we analyze the LVRT (Low Voltage Ride Through) conditions and reactive current injection standards established by Germany and Korea Electric Power Corporation (KEPCO). And, the LVRT control algorithm is applied to the designed inverter, and the operation of the grid-connected inverter was confirmed through simulation based on the LVRT boundary. In addition, the injection characteristic algorithm1 of active and reactive current in LVRT situation was modeled, and the modeled algorithm was verified by checking the simulation performance.

Key Words : Grid-connected Inverter, Inverter control, LVRT control

1. 서 론

세계적으로 신재생 발전 설비의 대용량화가 진행되면서 전 세계 계통 규정에서 계통 연계 운전에 대한 적용 범위와 기준이 더욱 엄격해지고 있다[1-5]. 계통 전압 강하시 계통 연계를 지속하는 Voltage Ride Through(VRT) 는 그 대표 사례중 하나로, 계통 전압이 일정 수준 이상 상승할 때의 동작 조건을 HVRT(High Voltage Ride Through), 일정 수준 이하로 감소할때의 조건을 LVRT (Low Voltage Ride Through)로 구분한다. 낮은 계통 전압 사고 상황에서 계통안정도에 영향이 더욱 고려되어야 하므로 HVRT 조건보다 세부적인 요구사항이 제시된다. 그림 1은 엄격한 규제로 대표적인 독일의 LVRT 계통 전압 경계선을 보여주며, 세계 각국에서 이 조건을 근거하여 LVRT조건을 제시하고 있다. LVRT 경계선은 x축은 시간, y축은 전압의 그래프로 그려지는데, 특정 전압 범위에 따라 무효전류 공급 기준이 존재한다. 본 논문에서는 LVRT 제어 알고리즘 설계를

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
https//orcid.org/0000-0001-8657-7350
* M.S and Ph.D course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https//orcid.org/0000-0003-1808-1534
https//orcid.org/0000-0003-2881-8931
** Undugraduate course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https//orcid.org/0000-0002-2682-8346
*** ESS Department Head, Eon Co., Ltd, Korea
https//orcid.org/0000-0002-7497-4970
Received : July 5, 2021
Revised : August 11, 2021., August 13, 2021
Accepted : August 13, 2021

Copyright ⓒ 2021 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위하여 국내 계통연계 유지 기준을 분석 하였으며, 국내 배전계통과 송전계통에 연계되는 계통 연계 유지 기준을 각각 다룬다. 또한 송전 전기설비 접속기준의 계통 연계 유지 기준을 기반으로 LVRT 알고리즘을 설계하며, 이 알고리즘이 적용된 계통 연계형 인버터의 시뮬레이션 동작을 분석한다. 그리고 계통 고장 발생시의 무효전류 공급 기준을 바탕으로 설계한 알고리즘에 대한 인버터 시뮬레이션 동작 분석 또한 수행되었다.

2. 본 론

2.1 독일의 LVRT 기준

Fig. 1은 독일의 LVRT 경계선을 나타내는 그래프이다. 각 영역에 대한 기준은 다음과 같다[2]. (a)영역 에서는 계통전압이 0%로 떨어지더라도 인버터는 계통과 바로 분리하지 않고 150ms 동안 운전을 지속해야한다. 사고 후 150ms 이후 계통전압이 30% 이상일 경우 (b) 영역에 속하며, 인버터는 계통과 연계를 지속하지만 계통 운영자의 동의하에 순간적으로 연결 분리를 할 수 있다. (c)영역 에서는 모든 경우에서 순간적인 계통과의 분리가 가능하며, 사고 종료 후 2초 이내 재 접속해야 한다. 150ms 이후 계통전압이 30% 이하일 경우 (d)영역에 속하며, 계통 연계에 대한 의무 또는 요구사항을 정의하지 않는다. (e) 영역에서는 (d) 영역과 마찬가지로 별도의 요구사항을 정의하지 않는다.

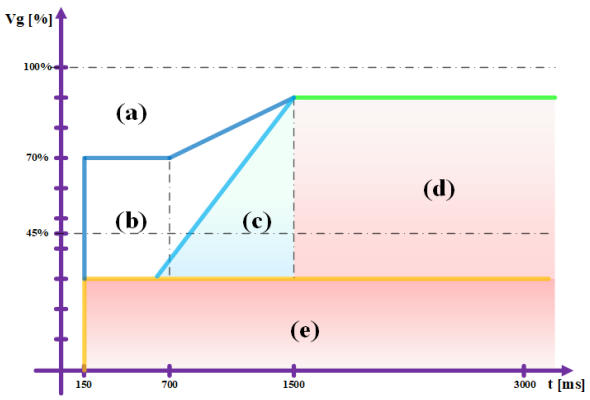


Fig. 1. LVRT voltage boundary line in German grid code

2.2 국내의 LVRT 기준

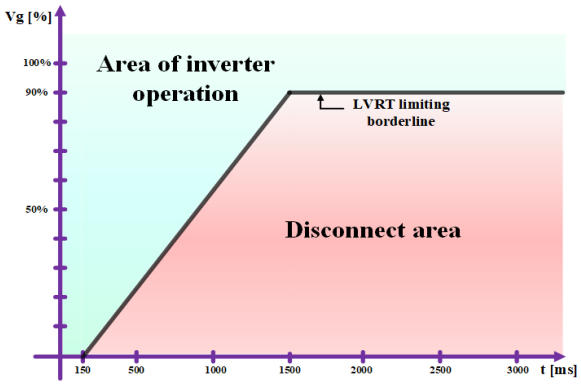


Fig. 2. LVRT voltage boundary line of KEPCO's transmission grid connection technology standard

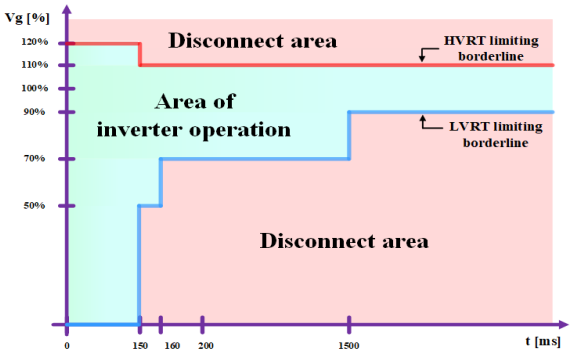


Fig. 3. LVRT, HVRT voltage boundary line of KEPCO's distribution system connection technology standard

국내(한국전력공사) LVRT 기준은 송전 계통과 배전계통 기술 기준으로 구분된다[6-7]. 각 기술기준에 따른 LVRT 요구 조건은 Fig. 2 와 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 2는 송전 계통의 계통 연계 유지 경계선을 보여준다. 이 한전 송전계통 규정의 LVRT 기준은 독일 LVRT 기준과 유사성을 보이는데, 이를 비교한 내용은 다음과 같다.

1) 계통 전압이 감소율이 순간적으로 100%가 되더라도 150ms 동안 계통과의 연계를 지속 한다.

2) 독일 규정의 (c) 영역의 경계선의 기울기는, 한전의 150ms부터 1500ms 까지 0.67p.u/sec 경계선의 기울기와 동일하다.

또한 두 기준의 차이점에 대한 설명은 다음과 같다.

1) 독일 LVRT 기준은 5개의 동작 영역으로 세분화 되어있지만, 한전의 기준은 2개의 영역 (계통연계 영역과 분리 영역)으로만 구분된다.

2) 독일 LVRT 기준의 (b)영역은 계통 운영자와 협의를 통해 (a) 또는 (c) 영역으로 선택적 동작을 하지만, 한전 규정은 독일의 (b) 영역에 해당하는 구간이 계통 연계 유지 구간으로 명확하게 설정되어 있다.

3) 독일 기준의 (d)영역과 (e)영역은 계통 연계에 대한 의무 또는 별도의 요구사항을 정의하지 않는 것과는 달리 한전 기준의 동일 영역에서는 계통 분리 영역으로 명확하게 설정되어 있다.

Fig. 3은 배전 계통의 계통 연계 유지 경계선을 보여준다. 계통전압이 정격전압의 90%~110% 일 경우 정상 동작 구간이며, 독일의 LVRT 조건과 마찬가지로 계통전압이 0%로 떨어지더라도 150ms 동안 계통과 인버터의 연결은 유지되어야 한다. 또한 계통 전압이 정격전압의 50% 이상 70% 미만일 경우 인버터와 계통과의 연결은 160ms 까지 지속해야 하며, 계통 전압이 정격전압의 70% 이상 90% 미만인 경우 계통과의 연결은 1.5초 까지 유지해야 한다. 또한 계통 전압이 110%~120% 인 HVRT 구간에서는 150ms 동안 계통과 연결이 분산형 전원이 운전을 지속해야 한다. 계통 전압이 정격전압의 120% 이상인 경우 즉시 운전을 중단한다.

2.3 LVRT 상황의 무효전류 공급 조건

LVRT 상황시 계통 전압 지원의 목적으로 설정된 독일의 계통 연계형 인버터의 무효전류 주입 기준[8-10]은 Fig. 4에 나타나 있으며, 계통 전압이 정격전압의 0.9p.u. 이하 일 때를 기준으로, 무효전류의 주입이 활성화 됩니다. 계통전압 강하 범위에 따른 유, 무효전류 공급 기준은 다음과 같습니다. 먼저 0.9p.u. 부터 1.1p.u. 구간은 식(1)을 따라 무효 전류는 0A, 유효 전류는 정격전류의 100%로 주입되며,

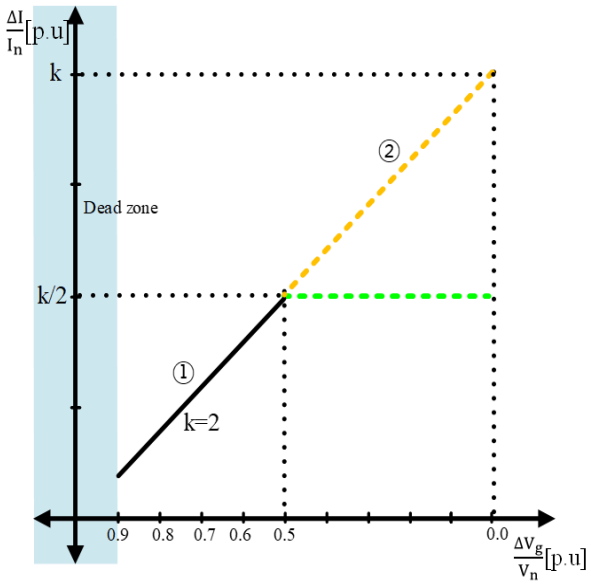


Fig. 4. Reactive current control curve in the event of grid voltage fault(Germany) (k=2)

이 영역을 Dead Zone 영역이라 지칭한다. 계통 전압 0.5p.u. 부터 0.9p.u. 구간은 식 (2)을 따라 유, 무효 전류가 주입된다. 0p.u.부터 0.5p.u. 구간은 일반적으로 녹색 점선인 ①번 선을 따라 그려지는데, 이 경우 인버터에서 계통에 인가되는 주입 전류는 정격의 100%로 공급되며, (3)의 수식을 따른다. 그리고 주황색 점선인 ②번 선의 경우 기존 k=2 기울기를 그대로 유지하며, 최대 200%의 전류를 계통에 인가하여 계통 전압 지원을 하고, 수식은 (4)를 따른다. 계통 고장시 무효전류 주입은 20ms 이내에 이루어져야 한다. 또한 계통 전압의 비대칭 결함 시 무효전류는 비 고장 상 전압의 110%가 넘지 않도록 주입되어야 한다[2].

$$i_d = I_N,\ I_q = 0A \quad (0.9p.u. \le V_g \le 1.1p.u.) \tag{1}$$

$$i_d = \sqrt{I_N^2 - I_q^2},\ I_q = k(1 - V_g)I_N \quad (0.5p.u. \le V_g < 0.9p.u.) \tag{2}$$

$$i_d = 0A,\ I_q = I_N \quad (0\ p.u. \le V_g < 0.5p.u.) \tag{3}$$

$$i_d = 0A,\ I_q = k(1 - V_g)I_N \quad (0\ p.u. \le V_g < 0.5p.u.) \tag{4}$$

2.4 LVRT 유, 무효전류 주입 알고리즘 시뮬레이션

Fig. 5는 시뮬레이션 회로도이며 PowerSIM 시뮬레이션을 통해 모델링 되었다. 설계한 인버터의 세부 사양은 Table 1에 나타나 있다.

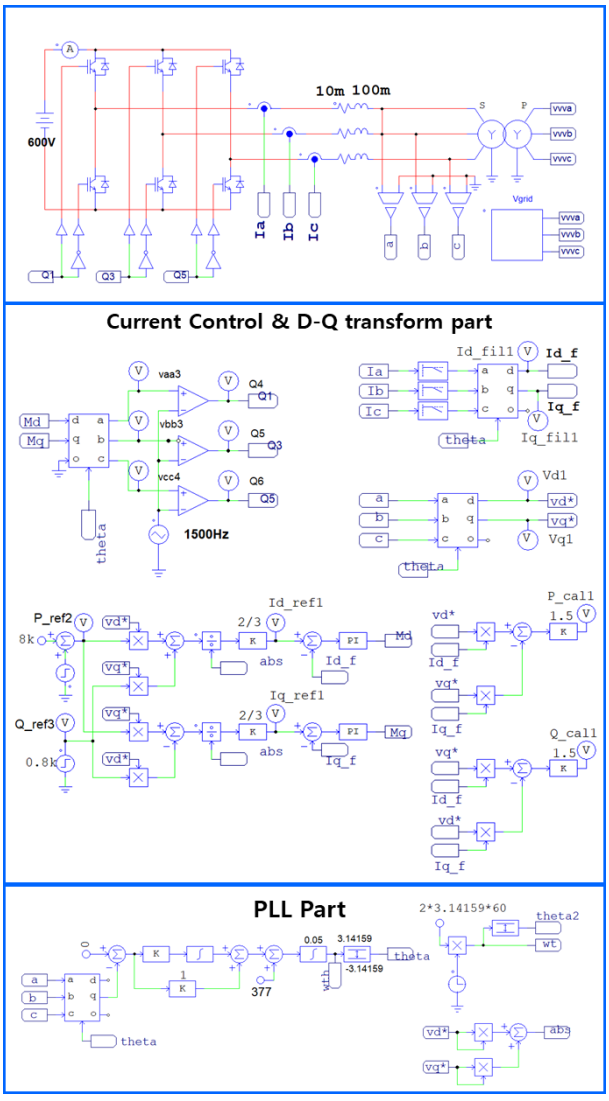


Fig. 5. PSIM Inverter simulation circuit

인버터의 제어회로는 동기 좌표 비례 적분 전류제어 회로와 계통 전압과 동기화를 위한 PLL(Phase Locked Loop) 회로로 구성되며, 이 제어회로를 C-block 을 사용하여 코드로 다시 작성한 뒤 LVRT 알고리즘을 추가한 회로가 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 7은 LVRT 상황에서 무효전류 공급 조건 알고리즘이 적용된 파형으로써, Fig. 4의 그래프에서 ①번 선을 따라 제어되는 파형으로, 계통 전압 0p.u 부터 0.5p.u 사이 구간에서 수식 (3)의 알고리즘이 적용되어 유효전류 0A, 무효전류는 정격전류의 100%로 주입된다. 계통전압이 200ms부터 0p.u로 떨어진 후 100ms 이내 상승하므로 인버터의 운전은 지속된다. Fig. 8은 계통 전압 0p.u부터 0.5p.u 사이 구간에서 수식 (4)의 알고리즘이 적용되어 유효전류 0A, 무효전류는 정격전류의 200%까지 상승하여 계통 전압을 협조한다. 0.5p.u.이상 구간은 식(2)를 따른다.

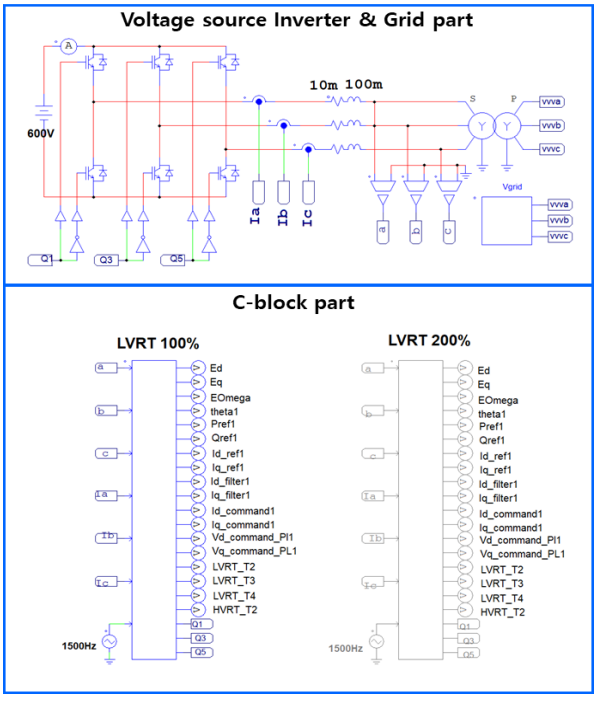


Fig. 6. PSIM Inverter simulation circuit with LVRT algorithm

Table 1. Specifcations of the grid connected inverter

V_I	V_o	P_{rated}	I_{rated}	L_{filter}	$f_{switching}$
600 Vdc	380 V_{rms}	8 kW	12.16 A_{rms}	10 mH	1.5 kHz

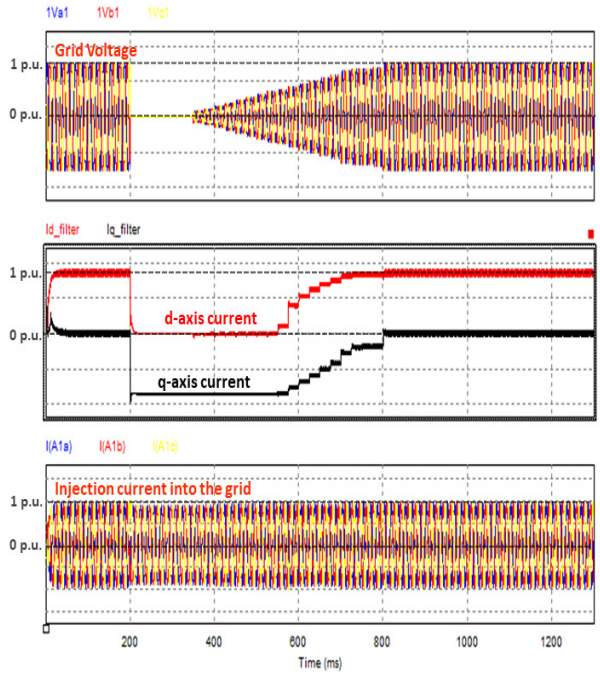


Fig. 7. Simulation result of active and reactive current injection performance in LVRT situation based on equation(3)

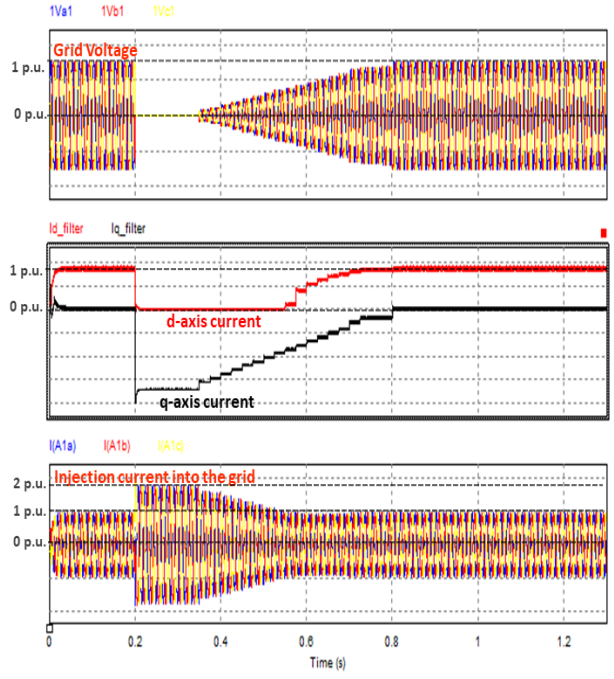
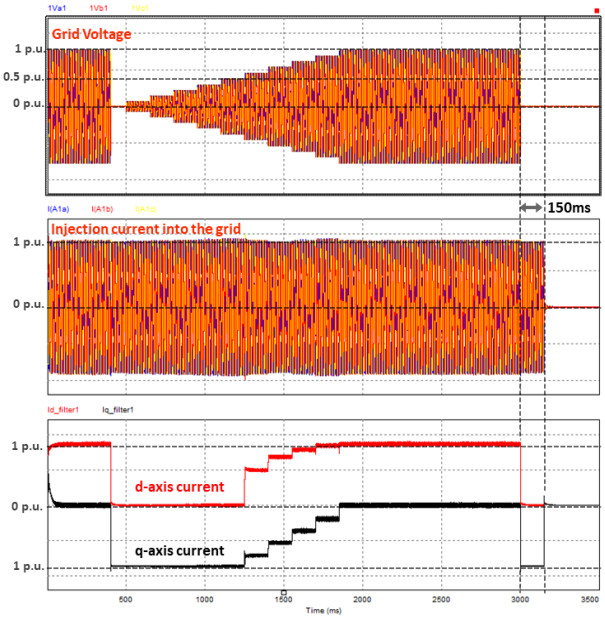


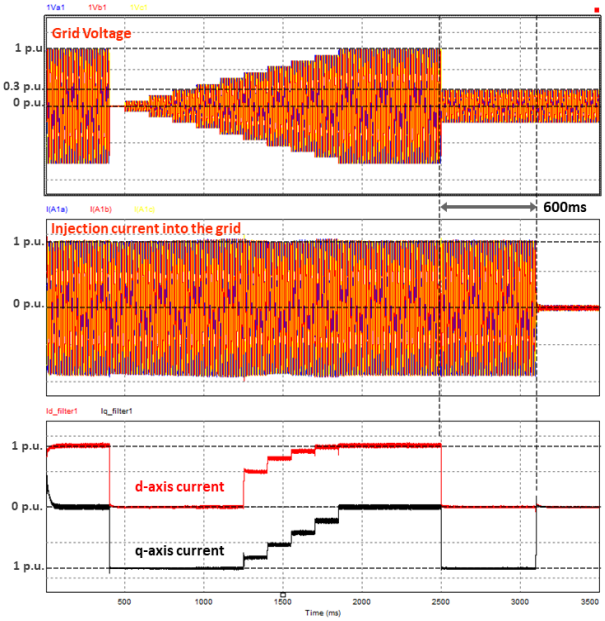
Fig. 8. Simulation result of active and reactive current injection performance in LVRT situation based on equation(4)

2.5 LVRT 동작 성능 시뮬레이션

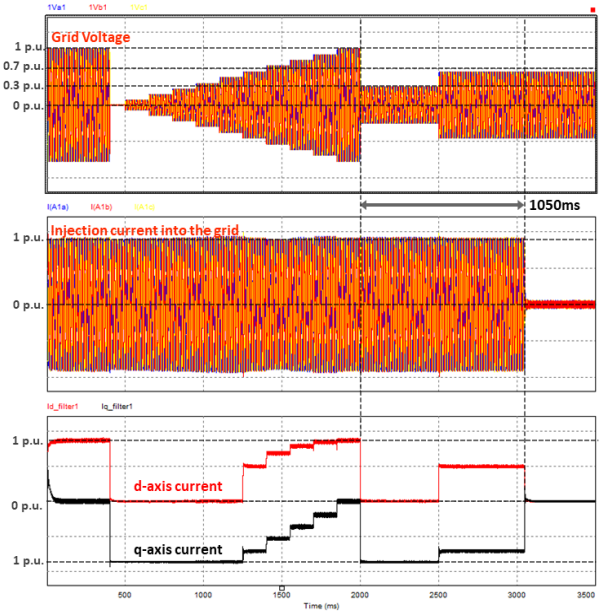
Fig. 9 는 LVRT 동작 시뮬레이션 파형이며, 한국전력공사의 송전계통의 LVRT 동작 기준을 기반으로 알고리즘이 적용되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Simulation results of LVRT performance under grid voltage fluctuation condition

Fig. 9 (a)에서는 3000ms 까지 계통 전압이 변동하더라도 LVRT 경계선을 넘어서지 않으므로 인버터의 동작은 유지되지만, 3000ms 에서, 계통전압이 0.1p.u 이하로 떨어진 뒤, 150ms 이 후 LVRT 경계선을 넘어서면서 인버터의 운전이 중지되는 파형을 보여준다. Fig. 9 (b)에서는 2500ms까지는 LVRT 경계선을 넘어서지 않으므로 인버터 운전이 멈추지 않고 지속되지만, 0.3p.u.의계통전압이 600ms이상 지속되면서, 인버터의 운전이 중단된다. Fig. 11은 2000ms 이 후부터 계통전압이 0.3p.u 로 감소되며, 계통전압이 0.65p.u로 상승하여도 계속해서 운전을 지속하지만, 1050ms에서 LVRT경계선을 넘어서면서 인버터의 운전이 정지되는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 인버터 시스템의 LVRT 제어 알고리즘 제어방안에 대하여 국 내외 기준 분석을 진행하였으며, 계통 전압강하 상황 시 독일의 무효전류 공급 기준을 따라 적용된 인버터 제어 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한, 한국 전력공사의 송전계통 규정의 LVRT 기준을 제어 알고리즘에 적용하였으며, LVRT 경계선을 기준으로 인버터의 운전 및 정지 상황을 시뮬레이션 상황에서 구현함으로써 계통 연계형 인버터에 적용한 LVRT 알고리즘 성능을 검증하였다. 본 논문에서 설계한 알고리즘은 50kW~수백kW급 태양광 PCS에 적용하기 위한 프로토타입 LVRT 제어 알고리즘으로써, 향 후, PCS 내부에 사용될 TNPC 3-LEVEL 인버터의 HILS(Hardware In the Loop system)를 기반으로 한 모델링과 TNPC 3-LEVEL 인버터에 적용 된 LVRT 제어 알고리즘의 검증에 대한 연구가 계속해서 수행될 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No.20192910100090)과 2021년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 지원(No.P0016220)을 받아 수행된 연구 과제입니다.

References

[1] "Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittel spannungsnetz des Netzbetreibers Erg nzungen des Netzbetreibers," Bundesverband der Energieund Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Berlin 2008.

[2] E. Troester, "New German Grid Codes for connecting PV Systems to the Medium Voltage Power Grid," In Proc. 2nd Int. Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants:Opt. Design, Prod., Grid Connection, pp.1-4, 2009.

[3] Mohamed EL-Shimy, Hussain Khairy, and Gamal M. Hashem, "Overview of Grid Code and Operational Requirements of Grid-connected Solar PV Power Plants," 10.13140/RG.2.2.28137.08809, 2015.

[4] Jens C. Boemer and Kevin Collins "IEEE P2800 Update," IEEE Standards Association, 2019.

[5] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems - Amendment 1, in IEEE Std 1547a-2014(Amendment to IEEE Std 1547-2003)," Vol., No., pp. 1-16, 21 May 2014, doi:0.1109 /IEEESTD.2014.6818982.

[6] KEPCO (2020) "Regulations on the Use of Electrical Equipment for Transmission and Distribution," : https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00706.jsp#

〔7〕 KEPCO (2020) "Linked Technical Standards for Distributed Power and Distribution Systems," work standard number: H0-distribution-standard-0015), https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00801.jsp
〔8〕 Camacho, A., et al., "Active and Reactive Power Strategies with Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters during Unbalanced Grid Faults," IEEE Trans. Ind. Electron, 1515-1525, 2015.
〔9〕 S.-F. Chou, C.-T. Lee, P.-T. Cheng, and F. Blaabjerg, "A Reactive Current Injection Technique for Renewable Energy Converters in Low Voltage Ride-through Operations," in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., Jul.24-29, pp. 1-7. 2011.
〔10〕 Ner Rule CHANGE PROPOSAL "Renewable Energy Revolution Pty Ltd, Advancing Renewable Energy Integration," 2019.

Biography



Hyun-Bin Jo

He received the B.S. degree in electronic engineering from Catholic University, Bucheon, South Korea, in 2016. He is currently pursuing his M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include Grid connected Inverter and high-voltage pulsed-power supply systems.



Jong-Beom Park

He is pursuing the B.S. degree at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. South Korea, from 2016. His research interests include power electronics and Grid connected Inverter.



Jae-Beom Ahn

He received the B.S. degree in electronic engineering from Kook-min University, Seoul, South Korea, in 2019. He is currently pursuing the integrated M.S. and Ph.D degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include power electronics and high-voltage pulse power systems.



Seung-Beom Lim

He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Dankook University, Yongin, Korea, in 2004, 2006, and 2014, respectively. Since 2007, he has been a General Manager of ESS R&D department on EON Co., Ltd., Anyang, Korea. His current research interests include multi-level converters/inverters, high-power density converter/inverter design, and modular UPSs.



Hong-Je Ryoo

He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Deajeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo is an Academic Director of the Korean Institute of Power Electronics, a senior member of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.