

단상 계통연계 인버터의 SRF 전력제어 방법

(A SRF Power Flow Control Method for Grid-Connected Single-Phase Inverter Systems)

박한얼* · 김은석 · 송중호**

(Han-Eol Park · Eun-Seok Kim · Joong-Ho Song)

요 약

화석에너지의 고갈과 환경오염 문제를 해결하기 위한 대안인 신재생 에너지를 이용하는 분산발전 시스템은 핵심 구성 요소인 PWM 인버터의 전력제어가 요구된다. 본 논문에서는 단상 계통연계 인버터 시스템의 전력제어를 위해 계통 임피던스를 고려한 SRF(synchronous-reference-frame) 전력제어 방법을 제안한다. 제안한 SRF 전력제어 방법은 복잡한 계통 임피던스의 추정 없이 계통 임피던스의 공칭값(nominal value)에 기반해 단상 인버터에 전압 기준값(reference)을 제공하여 독립운전 모드와 계통연계 모드에서 모두 운전이 가능함을 나타내었다. 또한, 유효전력과 무효전력의 독립적인 제어가 가능한 장점을 가진다. 계통을 포함하는 시뮬레이션을 통해 제안한 SRF 전력제어 방법의 타당성을 검증한다. 시뮬레이션 결과는 제안한 SRF 전력제어 방법을 통해 단상 계통연계 인버터 시스템의 전력 흐름을 적절히 제어할 수 있음을 보여주고 있다.

Abstract

It is well known that distributed generation(DG) system using renewable energy is an alternative to solve the problems which result from the exhaustion of fossil fuel and the environmental pollution. A PWM inverter is required for a power flow control in the DG systems. This paper proposes a SRF power flow control method considering grid impedance in grid-connected single-phase inverter systems. The proposed SRF power flow control method can provide a voltage-reference for the single-phase inverter even without any grid impedance estimation so that the single-phase inverter system could operate in stand-alone mode and grid-connected mode based on the known nominal value of grid impedance. Also independent controls of active and reactive power are achieved by the proposed control method. The effectiveness and the validity of the proposed control method are demonstrated through simulations. The simulation results show that the proposed control method can control properly power flow in grid-connected single-phase inverter systems.

Key Words : Power Flow Control, Single-Phase Inverter, Distributed Generation, SRF

* 주저자 : 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정

** 교신저자 : 서울산업대학교 전기공학과 교수

Tel : 02-970-6415, Fax : 02-978-2754, E-mail : joongho@snut.ac.kr

접수일자 : 2010년 2월 2일, 1차심사 : 2010년 2월 4일, 심사완료 : 2010년 2월 18일

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈과 환경오염 문제를 해결하기 위한 대안으로 태양광발전, 풍력발전, 연료전지 등을 이용하는 분산발전 시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며 따라서 분산발전을 구성하는 핵심 요소인 PWM 인버터에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1]. 이러한 분산발전 시스템은 일반적으로 독립운전 모드와 계통연계 모드 모두에서 안정적으로 운전해야만 한다. 분산발전 시스템은 인버터와 부하(local load), 계통 임피던스를 포함하는 복잡한 시스템으로 부하에 필요한 전력을 전달하면서 계통의 안정도를 떨어뜨리지 않도록 인버터의 전력제어(power flow control)가 요구된다. 일반적으로 전력제어 방법은 제어기가 이루어지는 좌표계(reference-frame)의 관점에서 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 첫 번째는 natural-frame에서 제어가 이루어지는 방법으로 dead beat 제어기 또는 히스테리시스 제어기를 이용한 방법들이 주로 연구되었다[2-3]. 이러한 연구들은 sample delay의 보상을 통한 디지털 구현에 관한 연구와 히스테리시스 제어기의 constant switching frequency에 관한 연구에 집중된 한계를 보인다. 두 번째는 stationary-reference-frame 제어방법으로 PR (proportional-resonant) 제어기를 적용하여 일반적인 PI 제어기를 사용했을 때 생길 수밖에 없는 정상상태 오차를 보상하기 위한 연구가 많이 이루어졌다[4]. 마지막은 synchronous-reference-frame(SRF) 제어방법으로 교류 제어변수를 직류 값으로 다룰 수 있기 때문에 일반적인 PI 제어기를 사용하면서 d-q decoupling을 위한 제어루프를 추가하는 형태의 연구가 많이 이루어졌다[5]. 이러한 연구는 주로 3상 계통에서 이루어졌으나 실제 분산발전 시스템은 낮은 전력레벨을 가진 단상 시스템으로 구현되는 경우가 많으므로 단상 시스템의 적용에 관한 연구도 이루어졌다[6]. 또한, 전력제어 방법은 크게 계통 임피던스를 고려하지 않는 방식과 계통 임피던스를 고려하는 방식으로 나눌 수 있다. 실제로는 분산발전 시스템에서 전력의 흐름이 생기게 되는 요인인 계통 임피던스에 대한 고려가 이루어져야 하지만 기존의 많은 연구에

서는 해석의 편의를 위해 계통 임피던스를 고려하지 않고 있다. 이에 비해 계통 임피던스를 고려하는 방식은 보다 신뢰성 있는 전력제어가 가능하며 상대적 우수성을 지닌다. 계통 임피던스를 고려한 전력제어에 관한 연구는 계통 임피던스의 추정 알고리즘에 집중되었는데 이를 위해서는 복잡한 계통 임피던스 추정 알고리즘 제어 루프가 추가되어야 하는 단점을 가진다[7].

따라서 본 논문에서는 계통연계 인버터 시스템의 전력제어를 위해 계통 임피던스의 영향을 고려한 SRF 전력제어 방법을 제안한다. 제안한 SRF 전력제어 방법은 일반적인 PI 제어기를 이용하여 PWM 인버터를 위상의 지연이나 정상상태의 오차 없이 제어 가능하고 복잡한 계통 임피던스의 추정 없이 계통 임피던스의 공칭 값에 기반해 단상 인버터에 전압 기준값 제공하여 독립운전 모드와 계통연계 모드에서 모두 운전이 가능하다. 또한, 유효전력과 무효전력의 독립적인 제어가 가능한 장점을 가진다. 계통을 포함하는 시뮬레이션을 통해 제안한 SRF 전력제어 방법의 타당성을 검증한다.

2. SRF 전력제어 방법

분산발전 시스템은 부하와 계통에 안정적으로 전력을 공급해야 한다. 그러므로 계통 임피던스의 영향에 따른 인버터 출력과 계통 사이의 전력 흐름의 특성을 파악하는 것이 중요하다. VSI(voltage-source inverter)가 정상상태에 있다면 단상 인버터는 그림 1과 같이 전압원으로 표현이 가능하고 A에서의 전력흐름은 다음과 같다[8].

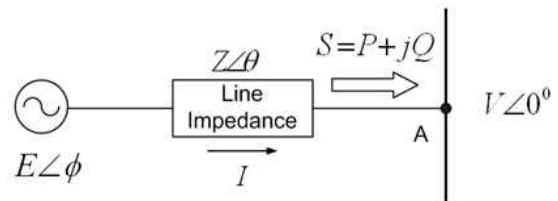


그림 1. 분산발전 시스템에서의 전력흐름
Fig. 1. Power flow in DG systems

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{V} \times \bar{I}^* = \bar{V} \left(\frac{\bar{E} - \bar{V}}{Z} \right)^* = V \left(\frac{Ee^{-j\phi} - V}{Ze^{-j\theta}} \right) \quad (1)$$

또한, 유효전력 P와 무효전력 Q는 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{VE}{Z} \cos(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \cos\theta \quad (2)$$

$$Q = \frac{VE}{Z} \sin(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \sin\theta \quad (3)$$

$Ze^{j\theta} = R + jX$ 이므로 식 (2), 식 (3)에 대입하면 다음과 같다.

$$P = \frac{V}{R^2 + X^2} [R(E\cos\phi - V) + EX\sin\phi] \quad (4)$$

$$Q = \frac{V}{R^2 + X^2} [X(E\cos\phi - V) + ER\sin\phi] \quad (5)$$

식 (4), 식 (5)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E\sin\phi = \frac{XP - RQ}{V} \quad (6)$$

$$E\cos\phi = \frac{RP + XQ}{V} + V \quad (7)$$

여기서 E와 V는 인버터 출력전압과 계통전압의 실효치를 의미하고, ϕ 는 power angle을 의미한다. 또한, Z와 θ 는 계통 임피던스의 크기 및 위상을 의미한다. 식 (6)과 식 (7)을 통해 Q가 0이고 P가 일정한 경우, $\cos\phi$ 값은 계통 임피던스 중 R에 비례하고 반대로 $\sin\phi$ 값은 X에 비례하는 것을 확인할 수 있다. 반면, P가 0이고 Q가 일정한 경우에는 $\cos\phi$ 은 X에 비례하고 $\sin\phi$ 값은 R에 반비례하는 것을 볼 수 있다. 따라서 일정한 P와 Q 값을 만족하는 $\cos\phi$ 와 $\sin\phi$ 값은 계통 임피던스에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 한편 인버터 출력전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \phi) \quad (8)$$

식 (8)의 인버터 출력전압과 크기는 같고 위상은 90° 앞선 임의의 전압 파형은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$e_I = \sqrt{2} E \cos(\omega t + \phi) \quad (9)$$

따라서 인버터 출력전압을 SRF 상으로 d-q 변환하게 되면 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} e \\ e_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} E \cos\phi \\ \sqrt{2} E \sin\phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T = \begin{bmatrix} \sin\omega t & \cos\omega t \\ \cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix}$$

식 (6), 식 (7)을 최댓값으로 변환한 식 (10)과 정확히 일치하므로 저항 R을 무시하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \frac{X}{\sqrt{2} V} Q + \sqrt{2} V \\ 2 \frac{X}{\sqrt{2} V} P \end{bmatrix} \quad (11)$$

실제 계통 임피던스 값을 정확히 측정하는 것은 어렵기 때문에 일반적으로 계통 임피던스는 $X \gg R$ 인 것으로 가정하여 식 (11)과 같이 생각할 수 있다. 그러나 이와 반대로 저압 배전망에서는 $R \gg X$ 인 특성이 나타날 수도 있으므로 이 경우 식 (11)은 다음과 같이 수정되어야 한다[9].

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \frac{R}{\sqrt{2} V} P + \sqrt{2} V \\ -2 \frac{R}{\sqrt{2} V} Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (11) 또는 식 (12)의 P와 Q를 기준값 P^* 와 Q^* 로 바꿔 대입하게 되면 원하는 전력을 제어할 수 있는 인버터 출력전압의 기준값을 SRF에서 얻을 수 있다. 그림 2는 제안한 전력제어 방법을 보인다. 이와 같은 방법은 $\sin\phi \approx 0$, $\cos\phi \approx 1$ 로 근사화 시키지 않으므로 기존의 방법에 비해 보다 정확한 제어가 가능하다. 또한

단상 계통연계 인버터의 SRF 전력제어 방법

전압제어를 통한 간접제어방식으로 독립운전 모드에서 전압조절이 용이한 장점이 있다.

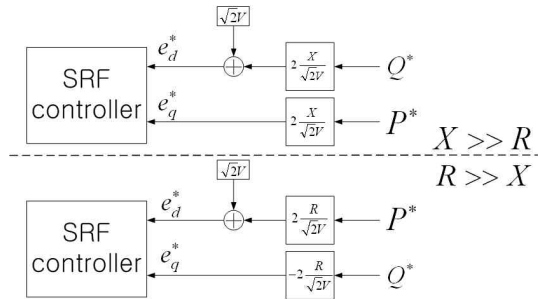


그림 2. 제안한 SRF 전력제어 방법
Fig. 2. Proposed SRF power flow controller

3. 독립운전 모드

독립운전 모드는 그림 2에서 전력 기준값 P^* 와 Q^* 를 0으로 지정함으로써 간단히 가능해진다. 따라서 전압 기준값은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} e_d^* \\ e_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} V \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

독립운전 모드를 위한 분산발전 시스템은 그림 3과 같다. 전압원은 dc 전압원으로 가정한다.

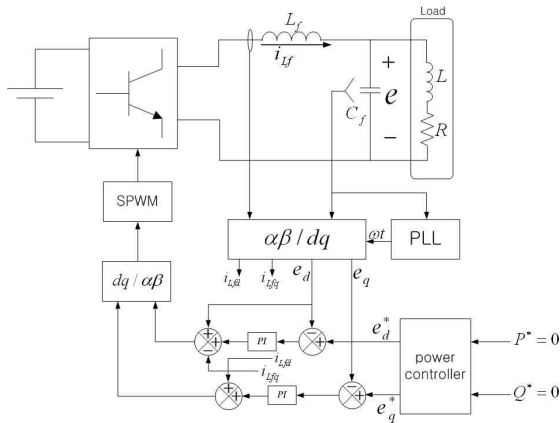


그림 3. 독립운전 모드
Fig. 3. stand-alone mode operation

그림 4에서 부하가 변동하는 경우의 인버터 출력전

압과 부하전류의 시뮬레이션 결과를 보인다. 부하가 변동하는 경우에도 인버터 출력전압이 흔들리지 않음을 확인할 수 있다.

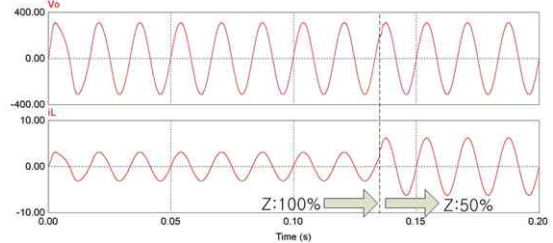


그림 4. 부하변동시 출력전압(위)과 부하전류(아래)
Fig. 4. Output voltage(top) and load current(bottom) at load step-change

4. 계통연계 모드

2절에서 제안한 SRF 전력제어 방법에서 계통 임피던스는 $X \gg R$ 또는 $R \gg X$ 라는 가정을 가진다. 또한, 계통 임피던스의 값을 미리 알아야 하는 어려움이 있다. 실제 계통 임피던스를 정확하게 측정하는 것은 어려운 일이므로 정상상태에서 전력의 기준값과 계통으로 흐르는 전력 사이에 오차가 발생할 수 있다. 그러나 실제 계통 임피던스를 정확히 측정할 수 없더라도

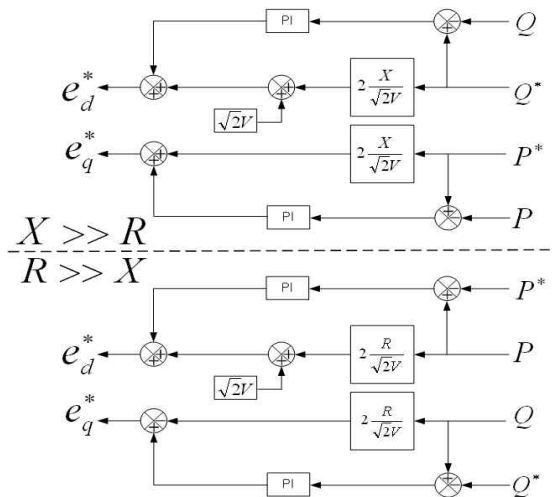


그림 5. 계통연계 모드를 위한 SRF 전력제어 방법
Fig. 5. Proposed SRF power flow controller with grid impedance uncertainty compensation loop

근사치인 공칭값을 쉽게 알 수 있으므로 계통 임피던스의 정확도에서 기인하는 정상상태 오차를 보상할 수 있다면 식 (11), 식 (12)는 여전히 유효하다. 계통연계 모드에서는 그림 5와 같이 계통 임피던스의 정확도에서 오는 오차를 보상하기 위한 루프를 추가한다.

계통연계 모드에서 전력 기준값은 유효전력 $P^* = P_{inverter} - P_{load}$, 무효전력 $Q^* = Q_{inverter} - Q_{load}$ 로 설정한다. 제안한 SRF 전력제어기를 포함한 계통연계형 분산발전 시스템을 그림 6과 같이 구성한다. 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 계통연계 모드 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Parameters of grid-connected mode operation

계통전압	220[Vrms], 60[Hz]
계통 임피던스 L_y	5[mH](at $X \gg R$) 0.01[mH](at $R \gg X$)
계통 임피던스 R_y	0.01[Ω](at $X \gg R$) 1[Ω](at $R \gg X$)

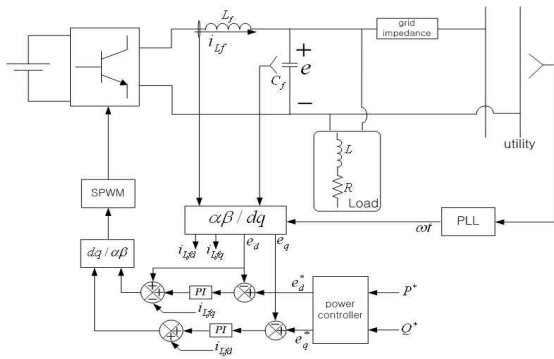


그림 6. 계통연계 모드
Fig. 6. Grid-connected mode operation

4.1 Case A

계통 임피던스가 $X \gg R$ 인 경우의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

그림 7은 유효전력의 기준값이 -305[W]에서 +305[W]로 변하는 경우 유효전력과 무효전력을 보여준다. 0.5초에서 유효전력의 변동이 일어나기 전 인버터는 부하의 유효전력 710[W] 중 50[%]를 부담하고 나머지

50[%]는 계통에서 부담하고 있다. 또한, 부하의 무효전력의 경우는 100[%] 계통에서 부담하고 있다. 즉 분산발전 시스템은 유효전력만을 출력하고 있다. 0.5초 이후 발전량이 늘어난다고 가정하면 인버터는 부하 유효전력을 전부 부담하면서 부하 유효전력크기의 50[%]인 305[W]를 계통에 넘겨주고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7의 결과는 제안한 SRF 전력제어 방법을 통해 무효전력의 변동 없이 유효전력만을 독립적으로 제어할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 8의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 그림 8의 0.5초 이전에는 부하의 무효전력의 100[%]를 인버터에서 부담하고 있다가 0.5초 이후에는 부하 무효전력의 50[%] 크기인 236[Var]를 계통에 넘겨주고 있다. 이와 동시에 한편으로는 부하의 유효전력을 전부 인버터에서 부담하면서 부하 유효전력 크기의 50[%]인 305[W]를 계통으로 넘겨주고 있음을 확인할 수 있다. 그림 8의 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 SRF 전력제어 방법을 통해 유효전력의 변동 없이 무효전력만을 독립적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

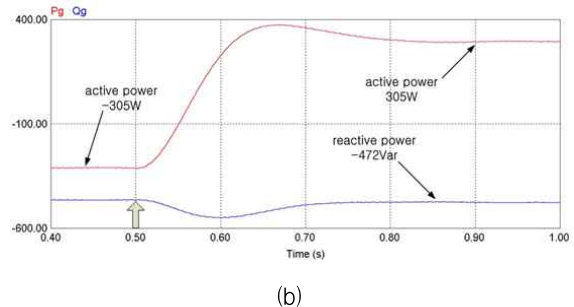
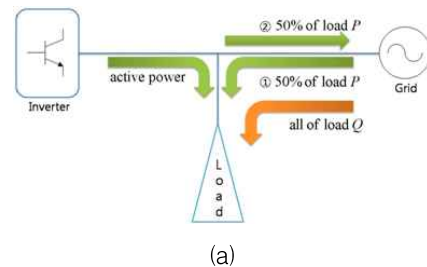


그림 7. 유효전력 기준값 변동시 유효전력과 무효전력
(a) 시뮬레이션 순서 (b) 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Power flow with step-change in active power (a) simulation sequence (b) simulation results

단상 계통연계 인버터의 SRF 전력제어 방법

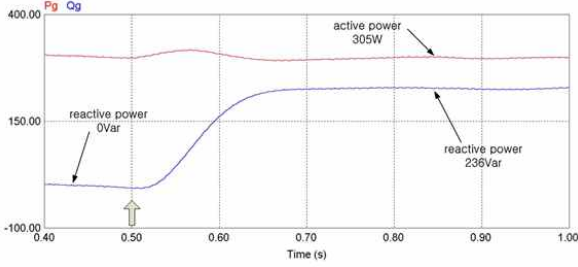
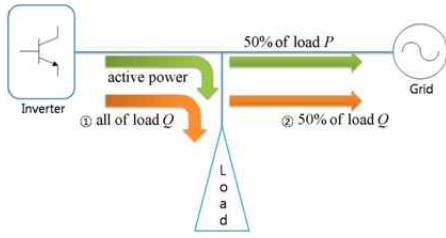


그림 8. 무효전력 기준값 변동시 유효전력과 무효전력
 (a) 시뮬레이션 순서 (b) 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Power flow with step-change in reactive power (a) simulation sequence (b) simulation results

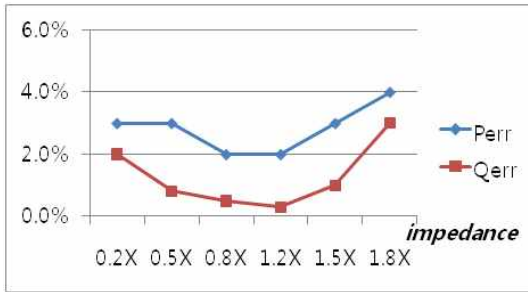


그림 9. 계통 임피던스의 공칭값과 실제 임피던스의 오차가 존재하는 경우의 유효전력과 무효전력 오차
 Fig. 9. Simulation result with error between nominal value and real value of grid impedance

그림 9에서는 제어기에 적용된 계통 임피던스의 공칭값과 실제값의 오차가 있는 경우 전력 기준값과 실제 전력값의 오차를 보인다. 이를 통해 알고 있는 계통 임피던스의 공칭값과 실제값의 차이가 존재하더라도 적절한 오차범위(4%) 이내에서 전력제어가 가능함을 확인할 수 있다.

4.2 Case B

계통 임피던스가 $R \gg X$ 인 경우의 case A와 같은 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

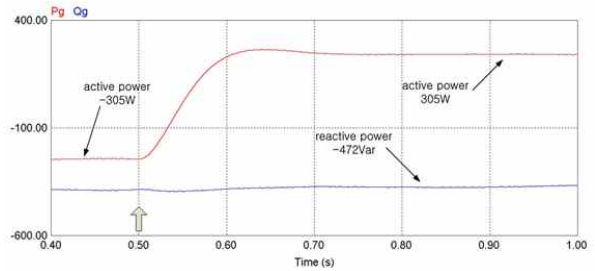


그림 10. 유효전력 기준값 변동시 유효전력과 무효전력
 Fig. 10. Power flow with step-change in active power

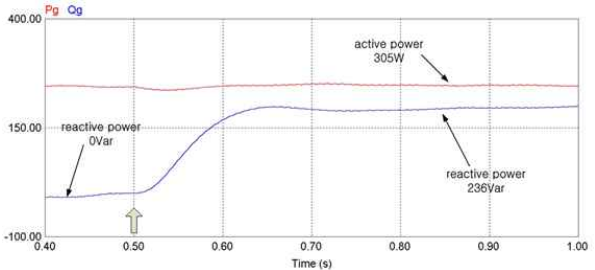


그림 11. 무효전력 기준값 변동시 유효전력과 무효전력
 Fig. 11. Power flow with step-change in reactive power

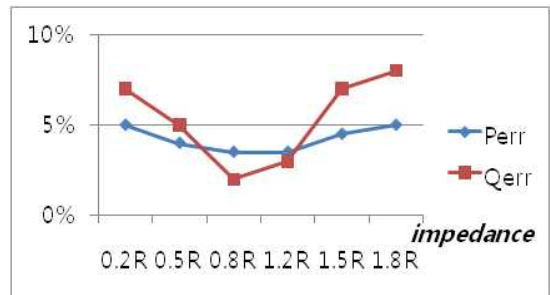


그림 12. 계통 임피던스의 공칭값과 실제 임피던스의 오차가 존재하는 경우의 유효전력과 무효전력 오차
 Fig. 12. Simulation result with error between nominal value and real value of grid impedance

5. 결 론

본 논문에서는 분산발전을 위한 단상 계통연계 인버터의 SRF 전력제어 방법을 제안한다. 제안한 SRF 전력제어 방법은 단상 교류신호를 직류로 변환하여 제어하므로 단상 인버터를 위상의 지연이나 정상상태 오차 없이 제어 가능하고 복잡한 계통 임피던스의 추정 없이 계통 임피던스를 고려한 유효전력과 무효전력의 독립적인 제어가 가능하다. 또한, 독립운전 모드에서는 인버터의 출력전압 제어가, 계통연계 모드에서는 유효전력과 무효전력 흐름의 제어가 가능한 장점을 지닌다. 시뮬레이션을 통해 제안한 SRF 전력제어 방법의 타당성을 검증한다. 시뮬레이션 결과는 제안한 SRF 전력제어 방법이 인버터의 출력전압과 유효전력, 무효전력을 운전모드에 따라 적절히 제어할 수 있음을 확인하고 있다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] S. Ko, S. Lee, H. Dehbonei, and C. Nayar, "Application of voltage- and current-controlled voltage source inverters for distributed generation systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 782-792, 2006.
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Lieserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, 2006.
- [3] L. Malesani, P. Mattavelli, and P. Tomasin, "Improved constant-frequency hysteresis current control of VSI inverters with simple feedforward bandwidth prediction", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, no. 5, pp. 1194-1202, 1997.
- [4] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters", *IEEE Trans. on Power Applications*, vol. 153, no. 5, pp. 750-762, 2006.
- [5] R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1323-1332, 2004.
- [6] R. Kim, S. Choi, and J. Suh, "Instantaneous control of

average power for grid tie inverter using single phase D-Q rotating frame with all pass filter", in *proc. of IEEE IECON 2004*, pp. 274-279, 2004.

- [7] A. Timbus, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and M. Ciobotaru, "Line impedance estimation using active and reactive power variations", in *proc. of IEEE PESC 2007*, pp. 2173-2179, 2007.
- [8] K. Brabandre, B. Bolsens, J. Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1107-1115, 2007.
- [9] J. Guerrero, J. Matas, L. Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, 2007.

◇ 저자소개 ◇



박한얼(朴韓爾)

1980년 5월 5일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 서울산업대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2008년~현재 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정.

E-mail : haneol@snut.ac.kr



김은석(金銀錫)

1981년 1월 11일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 서울산업대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 이화전기 연구원.

E-mail : seok@eti21.com



송중호(宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신대 초빙연구원. 1982~1985년 이화전기 기술개발부.

1985~2002년 한국과학기술원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002년~현재 서울산업대학교 공과대학 전기공학과 부교수.

E-mail : joongho@snut.ac.kr