

Double-PLL을 이용한 홀 센서 기반 PMSM 제어의 위치 추정 성능 개선

이송철¹, 정영석[†]

Performance Improvement of Position Estimation by Double-PLL Algorithm in Hall Sensor based PMSM Control

Song-Cheol Lee¹ and Young-Seok Jung[†]

Abstract

This paper proposes a double-phase-locked-loop (PLL) to improve the performance of position estimation in hall sensor-based permanent magnet synchronous motor control. In hall sensor-based control, a PLL is normally used to estimate the rotor position. The proposed Double-PLL consists of two PLLs, including a reset type integrator. The motor control is more accurate and has better performance than conventional PLL, such as a small estimated position ripple. The validity of the proposed algorithm is verified by simulations and experiments.

Key words: PLL(Phase-Locked-Loop), Hall sensor, PMSM, Double-PLL

1. 서 론

최근 들어 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 출력 밀도, 신뢰성 그리고 에너지 효율로 인해 펌프, 블로워 그리고 압축기 등 많은 산업 응용에 널리 사용되고 있다. 이러한 PMSM을 제어하기 위한 방법 중 벡터 제어가 가장 널리 사용되고 있는데 이를 위해서는 회전자의 위치 정보가 필수적이다. 레졸버, 엔코더 그리고 홀 센서 등이 회전자 위치 정보를 얻기 위해 일반적으로 사용되고 있다. 레졸버와 엔코더의 경우 정밀하다는 장점이 있지만 가격이 비싸고 축 결합 등 기계적인 구조의 추가가 필요하다. 반면에 홀 센서의 경우 가격이 저렴하고 기계적인 축 결합이 필요 없다는 장점이 있다^[1-6].

홀 센서는 60°의 분해능을 가지기 때문에 전기각 1회전당 6개의 회전자 위치 정보만을 얻을 수 있다. 따라서 정밀한 벡터 제어를 위해서는 이 홀 센서로부터 얻은

회전자 위치 정보에 추가적인 알고리즘이 필요하다. 홀 신호의 시간 차이를 이용하여 평균 회전자 속도를 구하고 그 속도 정보를 적분하여 회전자 위치를 추정하는 방법이 초기에 많이 사용되어 왔다^[1-3]. 구현이 간단하다는 장점이 있으나 가변 시스템에서 사용하기에는 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 여러 알고리즘들이 연구되어 왔다. 그 중 observer를 이용한 많은 알고리즘들이 연구되어 왔고 rotor position observer, dual observer 그리고 PLL(Phase-Locked-Loop)을 이용한 vector tracking observer 등이 있다^[4-7]. 이러한 observer를 이용한 알고리즘들은 평균 속도를 이용하는 알고리즘보다 가변 제어에서 강인한 추정 성능을 보이나 알고리즘의 구조 및 연산이 복잡하고 모터 파라미터를 알아야 하는 단점이 있다.

복잡한 observer 알고리즘 없이 단순히 PI제어기와 적분기로 구성된 PLL 알고리즘 만으로도 회전자 위치 추정이 가능하다. 홀 센서의 위치 정보가 변할 때 고주파 성분의 신호가 포함되는데 이는 회전자 추정 위치의 리플 성분으로 나타나게 된다. 이 리플 성분을 충분히 감쇠시키기 위해서는 PLL의 극점을 작게 선정하면 되지만 이는 과도응답특성을 나쁘게 한다.

본 논문에서는 홀 센서를 이용한 새로운 회전자 위치 추정 알고리즘인 Double-PLL을 제안한다. Double-PLL은 PI 제어기와 적분기로 구성된 PLL 2개가 직렬로 결

Paper number: TKPE-2017-22-3-12

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: yousjung@pknu.ac.kr, Dept. of Mechanical Design Eng., Pukyong Nat'l Univ.

Tel: +82-51-629-6165 Fax: +82-51-629-6150

¹ Dept. of Mechanical Design Eng., Pukyong Nat'l Univ. Manuscript received Feb. 27, 2017; revised Mar. 8, 2017; accepted Apr. 6, 2017

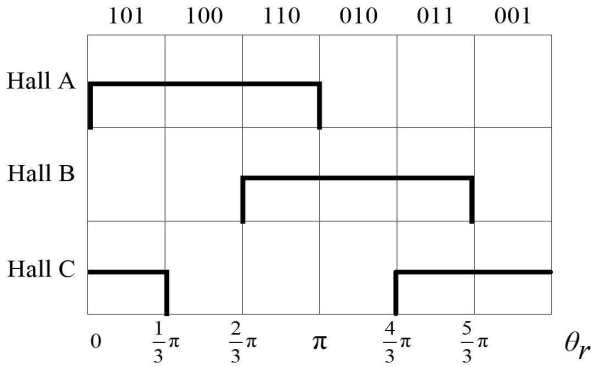


Fig. 1. Output signal of hall sensor.

합되어 있는 형태이고 1차 PLL과 2차 PLL사이에는 리셋 적분기와 홀 위치 정보가 더해지는 리셋 로직이 포함되어 있다. 리셋 적분기는 홀 신호가 변할 때 적분기를 리셋 시키는 역할을 한다. Double-PLL의 경우 PLL과 동일한 극점으로도 유사 수준의 과도응답특성을 유지하면서도 회전자 추정 위치의 리플 성분을 더욱 감소시킬 수 있다. Double-PLL의 개념을 n차로 확장하여 Triple-PLL, Quadruple-PLL까지도 생각할 수 있지만 알고리즘의 복잡성과 실제 응용에서의 실용성을 고려하여 본 논문에서는 Double-PLL을 제안한다. 다만 Triple-PLL에 대한 시뮬레이션을 통해 n차계로의 확장 가능성을 입증한다. 제안하는 알고리즘의 유효성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 홀 센서를 이용한 PLL 알고리즘

홀 센서로부터 전기각 1회전당 6개의 위치 정보를 얻을 수 있다. 회전자 위치 정보에 따른 홀 신호를 그림 1에 나타내었다. 이 6개의 위치 정보를 회전자 위치 정보의 형태로 나타내면 그림 2의 θ_H 와 같이 변환할 수 있다. 이 계단 신호 형태의 θ_H 를 PLL의 입력으로 이용하여 램프 신호 형태의 추정 위치를 구할 수 있다. 그림 3은 PLL의 블록도를 나타낸다. PLL은 PI제어기와 적분기로 구성되어 있다. PLL의 입력은 θ_H 이고 출력은 $\hat{\theta}$ 이다. 입출력의 관계를 전달함수로 나타내면 식 (1)과 같고 PI 계인을 극점(p_1, p_2)을 이용하여 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 극점을 적절하게 선정하면 실제 위치 정보와 유사한 램프 신호 형태에 가까운 추정 위치를 구할 수 있다.

$$\frac{\hat{\theta}}{\theta_H} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} K_p &= p_1 + p_2 \\ K_i &= p_1 p_2 \end{aligned} \quad (2)$$

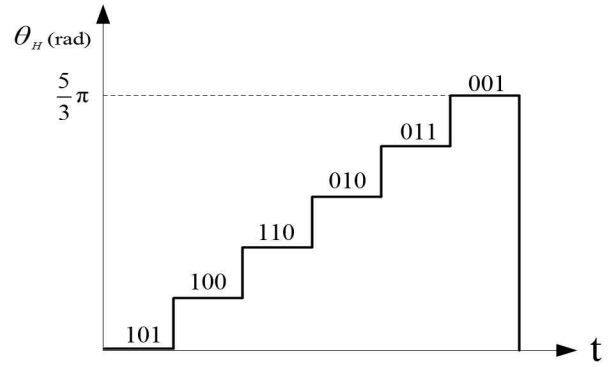


Fig. 2. Hall theta using output signal of hall sensor.

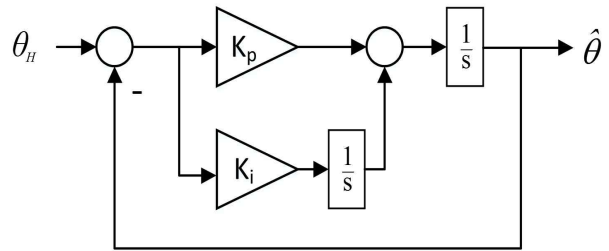


Fig. 3. Block diagram of PLL.

3. 제안하는 Double-PLL 알고리즘

홀 위치 정보가 변경될 때 스텝 신호가 생기면서 고주파 성분의 신호가 포함된다. 이 고주파 성분들이 $\hat{\theta}$ 의 리플을 만들기 때문에 램프 신호 형태의 위치 정보를 얻기 위해서는 이 고주파 신호를 충분히 감소시켜야 한다. PLL 알고리즘에서 극점을 작게 선정하여 대역폭을 줄인다면 리플을 충분히 감소될 수 있다. 그러나 대역폭을 줄이게 된다면 과도응답특성이 나빠지게 된다. 제안하는 Double-PLL 알고리즘은 PLL 알고리즘과 동일한 극점으로 과도응답특성을 나쁘게 하지 않으면서 리플 감소특성을 개선시킬 수 있다.

그림 4는 Double-PLL 알고리즘의 블록도를 나타내었다. 기본적인 구조는 PLL 2개가 결합되어 있는 형태이고 1차측과 2차측 PLL사이에는 리셋 로직이 포함되어 있다. 이 리셋 로직은 리셋 적분기와 2차측 PLL에 θ_H 가 더해지는 부분으로 구성되어 있다. 리셋 적분기는 홀 센서로부터 얻은 정보가 변경될 때 적분기 출력 값을 리셋한다. Double-PLL은 비선형 시스템이기 때문에 전달함수를 구할 수 없다. 다만 고주파 영역에서 시뮬레이션을 통해 Double-PLL의 리플 감소 특성이 PLL 2개가 단순히 직렬로 연결된 구조(2-PLL)와 유사함을 확인하였다. 2-PLL의 블록다이어그램과 전달함수를 그림 5와 식 (3)에 각각 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 각 운전 주파수별 회전자 추정 위치의 리플 크기를 측정하였고 상대적인 비를 그림 7의 보드선도에 나타내었다.

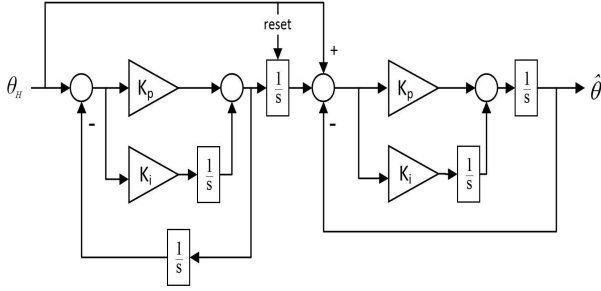


Fig. 4. Block diagram of proposed double-PLL.

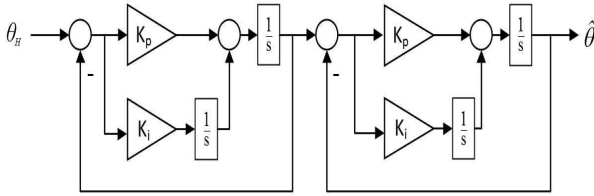


Fig. 5. Block diagram of 2-PLL.

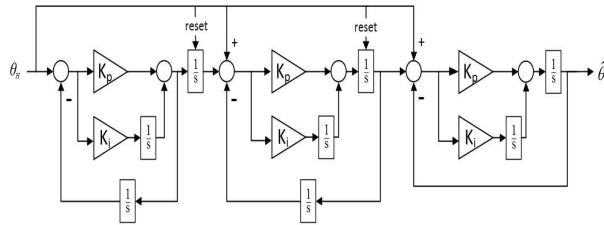


Fig. 6. Block diagram of Triple-PLL.

그림 7에는 PLL과 2-PLL의 전달함수에 대한 응답 및 PLL의 시뮬레이션 결과도 나타나있다. 보드선도의 크기 응답을 통해 Double-PLL이 PLL보다 고주파 영역에서 리플 감쇠 특성이 우수한 것을 알 수 있다. 그리고 Double-PLL과 2-PLL의 리플 감쇠 특성이 유사함을 이용하여 Double-PLL의 극점 설계시 2-PLL의 전달함수로부터 원하는 리플 감쇠 특성을 갖는 극점을 선정 할 수 있다. 2-PLL의 경우 리플 특성은 Double-PLL과 유사하지만 과도응답특성은 Double-PLL과 PLL보다 좋지 않다. 이는 4장의 시뮬레이션 결과를 통해 확인한다.

Double-PLL의 개념을 n차계로 확장하여 Triple-PLL도 고려 할 수 있다. 그림 6에 Triple-PLL의 블록다이어그램을 나타내었고 Double-PLL과 동일한 방법으로 고주파 영역에서 리플 감쇠 특성 대한 시뮬레이션을 하였다. 그림 7에 Triple-PLL의 시뮬레이션 결과 및 3-PLL의 전달함수에 대한 응답을 함께 나타내었다. Double-PLL보다도 고주파 리플 감쇠 특성이 우수함을 알 수 있지만 알고리즘의 실제 구성이 더욱 복잡해진다.

$$\frac{\hat{\theta}}{\theta_H} = \left(\frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \right)^2 \quad (3)$$

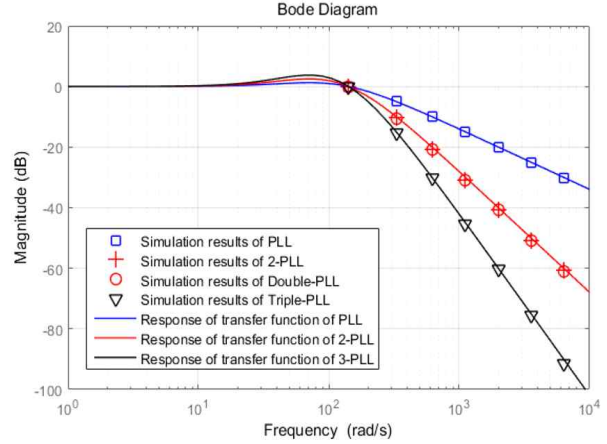


Fig. 7. Bode diagram and simulation results($p_1 = 100, p_2 = 100$).

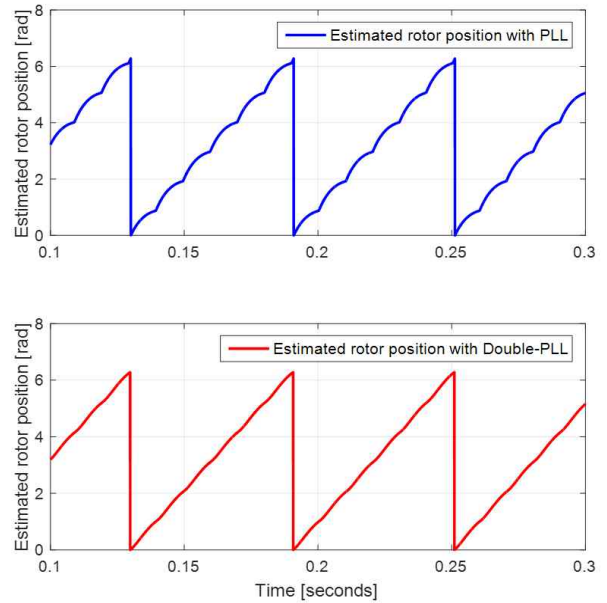


Fig. 8. Estimated rotor position with PLL and Double-PLL(speed = 1,000[RPM], $p_1 = 100, p_2 = 100$).

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안하는 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 8은 PLL과 Double-PLL의 리플 감쇠 특성을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 동일한 극점에 지령속도 1,000[RPM]으로 운전 시 회전자 추정 위치를 나타내었다. Double-PLL을 이용한 추정 위치가 PLL을 이용한 추정 위치보다 리플 성분을 더 많이 감소시키는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9와 그림 10은 부하에 따른 PLL, Double-PLL 그리고 Triple-PLL의 과도응답특성을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 지령속도 1,000[RPM]으로 정상상태

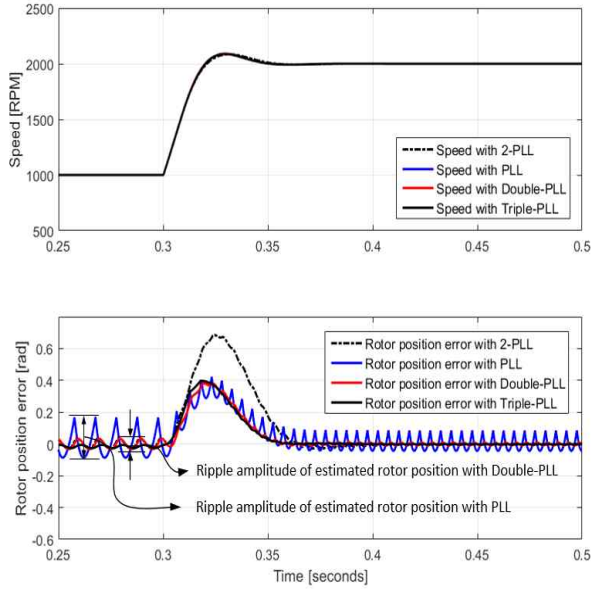


Fig. 9. Speed and rotor position error when reference speed is changed at 0.3 [s](Load = 0.1[N·m], $p_1 = 100$, $p_2 = 100$).

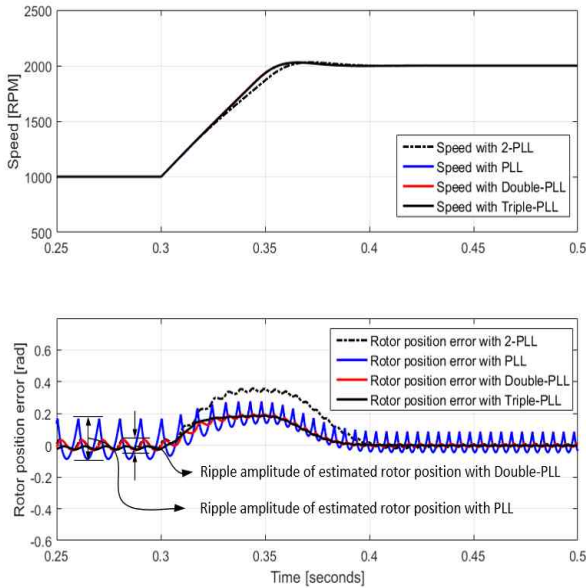


Fig. 10. Speed and rotor position error when reference speed is changed at 0.3[s](Load = 1.0[N·m], $p_1 = 100$, $p_2 = 100$).

운전 중 2,000[RPM]으로 스텝 변경하였을 때의 실제 속도 및 실제 회전자 위치와 각각의 알고리즘으로 구한 추정 위치 간의 오차를 나타내었다. 리플 크기의 경우 부하에 관계 없이 동일한 것을 확인 할 수 있다. 그리고 리플 성분을 제외한 과도응답특성의 경우 부하에 따라 다른 응답특성이 나타나지만 각각의 부하에 대한 PLL, Double-PLL 그리고 Triple-PLL의 과도응답특성은 거의

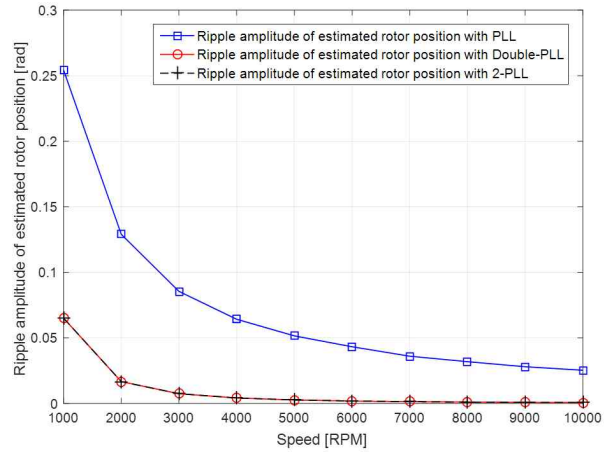


Fig. 11. Ripple amplitude of estimated rotor position for different speed conditions($p_1 = 100$, $p_2 = 100$).

TABLE I
PARAMETERS OF PMSM

Parameter	Value
Number of pole-pairs	1
DC link Voltage	48 [V]
Armature resistance	0.006 [Ω]
d-axes inductance	0.02 [mH]
q-axes inductance	0.02 [mH]
Magnet flux linkage	0.032 [Wb]
Rated current	300 [A]
Moment of inertia	2.036×10^{-4} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

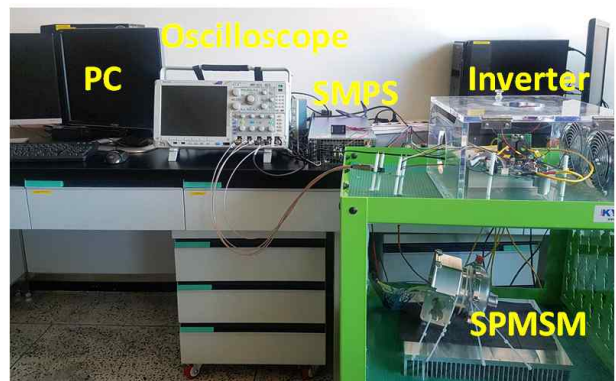


Fig. 12. Experiment equipments.

동일함을 확인 할 수 있다.

그림 11은 PLL과 Double-PLL 그리고 2-PLL의 운전 속도에 따른 추정 위치의 리플 크기를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 1,000[RPM]에서 10,000[RPM]까지의 운전 영역에서 Double-PLL이 PLL보다 리플 감소 특성이 우수한 것을 알 수 있다. 그리고 Double-PLL과 2-PLL의

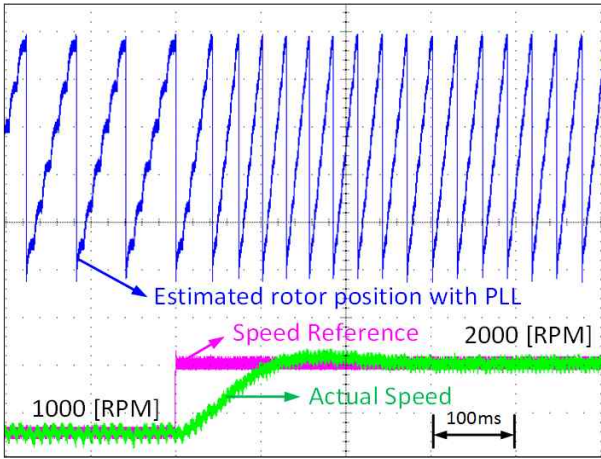


Fig. 13. Estimated rotor position and speed with PLL when reference speed is changed($p_1 = 100, p_2 = 100$).

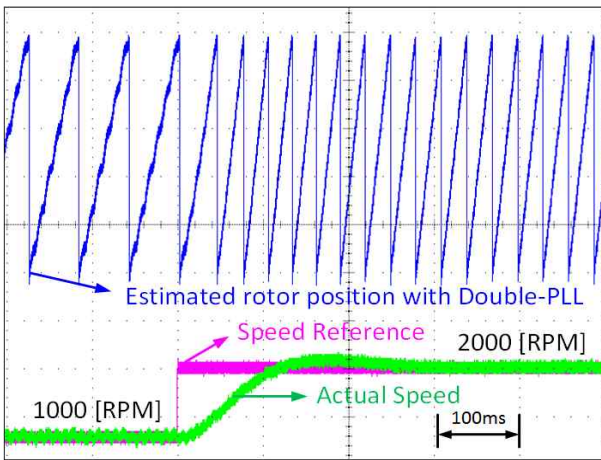


Fig. 14. Estimated rotor position with Double-PLL when reference speed is changed($p_1 = 100, p_2 = 100$).

리플 감쇠 특성이 동일함을 통해 고주파 영역에서의 특성이 동일한 것을 확인 할 수 있다.

5. 실험

그림 12는 실험장치 구성을 나타내었다. 실험에 사용된 DSP는 TI사의 TMS320F28335이고 모터의 파라미터를 표 1에 나타내었다. 그림 13과 그림 14는 PLL과 Double-PLL의 1,000[RPM]에서 2,000[RPM]으로 지령속도 변화시 과도상태 및 정상상태의 회전자 추정 위치 응답을 나타낸 것이다. 속도 변화시 리플 성분을 제외한 Double-PLL과 PLL의 회전자 추정 위치 응답 파형이 램프 신호 대비 유사함을 확인 할 수 있고 속도의 과도 응답 역시 유사한 것을 확인 할 수 있다. 1000[RPM]에서 Double-PLL을 이용한 회전자 추정 위치가 PLL을 이용한 회전자 추정 위치보다 리플 성분이 더 줄어들었음을 확인 할 수 있다. 그림 15와 그림 16은 2,000[RPM]으로

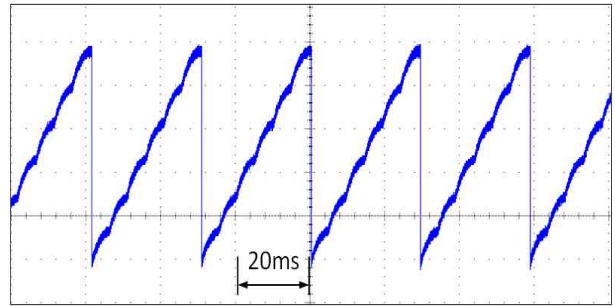


Fig. 15. Estimated rotor position with PLL(speed = 2000rpm, $p_1 = 100, p_2 = 100$).

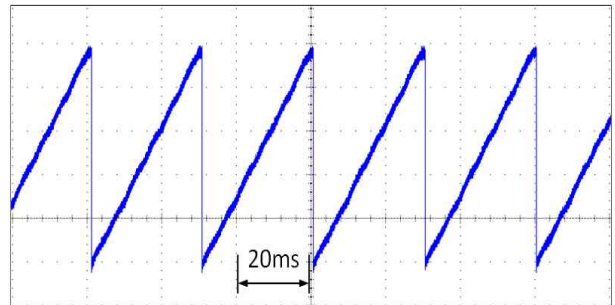


Fig. 16. Estimated rotor position with Double-PLL(speed = 2000rpm, $p_1 = 100, p_2 = 100$).

정상상태 운전 시 회전자 추정 위치의 확대파형이다. 2,000[RPM]에서도 Double-PLL이 PLL보다 리플 감쇠 특성이 우수함을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 홀 센서 기반의 PMSM제어에서 새로운 회전자 위치 추정 알고리즘인 Double-PLL을 제안하였다. 리플 감쇠 특성에 대한 시뮬레이션을 통해 Double-PLL이 2-PLL과 고주파 영역에서 리플 특성이 유사함을 보였다. 이를 통해 2-PLL의 전달함수를 이용하여 원하는 리플 크기 및 응답특성을 갖는 극점을 선정 할 수 있다. Triple-PLL에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 Double-PLL의 n차계로 확장 가능성에 대해 입증하였다. 다만 실제 응용에서 알고리즘 구현이 복잡해진다. 실험 및 시뮬레이션을 통해 Double-PLL이 PLL과 비교하였을 때 동일 극점 대비 유사 수준의 과도응답특성을 유지하면서 회전자 추정 위치의 리플 감쇠 특성을 개선시킬 수 있음을 검증하였다.

이 논문은 부경대학교 자물창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음

References

- [1] S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sinusoidal current drive system of permanent magnet synchronous motor with low resolution position sensor," *Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, San Diego, CA*, pp. 9-14, Vol. 1, 1996.
- [2] P. Zhang and Q. Zhang, "A controller of PMSM for electrical bicycle with hall effect sensors," *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Hefei*, pp. 619-623, 2016.
- [3] H. B. Kim, S. M. Yi, N. S. Kim, and R. D. Lorenz, "Using low resolution position sensors in bumpless position/speed estimation methods for low cost PMSM drives," *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, Vol. 4, pp. 2518-2525, 2005.
- [4] Z. Wang, K. Wang, J. Zhang, C. Liu, and R. Cao, "Improved rotor position estimation for permanent magnet synchronous machines based on hall-effect sensors," *Aircraft Utility Systems (AUS), IEEE International Conference on*, pp. 911-916, Oct. 2016.
- [5] S. Y. Kim, C. Choi, K. Lee, and W. Lee, "An improved rotor position estimation with vector-tracking observer in PMSM drives with low-resolution hall-effect sensors," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 9, pp. 4078-4086, Sep. 2011.
- [6] M. S. Huang, C. H. Chen, H. H. Chou, G. Z. Chen, and W. K. Tsai, "An accurate torque control of permanent magnet brushless motor using low-resolution hall-effect sensors for light electric vehicle applications," *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO*, pp. 175-179, 2013.
- [7] A. Yoo, S. K. Sul, D. C. Lee, and C. S. Jun, "Novel speed and rotor position estimation strategy using a dual observer for low-resolution position sensors," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 12, pp. 2897-2906, Dec. 2009.

**이송철(李松哲)**

1989년 8월 14일생. 2014년 부경대 기계자동차공학과 졸업. 2016년 동 대학원 기계설계공학과 졸업(석사). 2016년~현재 동 대학원 기계설계공학과 박사과정.

**정영석(丁永錫)**

1970년 3월 15일생. 1992년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1999년~2002년 현대오토넷 선임연구원. 2002년~현재 부경대 기계설계공학과 교수.