DBpia

Look-up table 기반 PMSM 제어시 최종 출력 데이터 선형 보간 오차 개선 방법

Final Output Data Interpolation Error Improvement for Look-up Table Based PMSM Control Method

저자
(Authors)

이정효
Jung-Hyo Lee

출처
(Source)

조명·전기설비학회논문지 32(7), 2018.7, 45-50(6 pages)
Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 32(7), 2018.7, 45-50(6 pages)

발행처
(Publisher)

한국조명·전기설비학회
The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers

URL

http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07503804

APA Style

이정효 (2018). Look-up table 기반 PMSM 제어시 최종 출력 데이터 선형 보간 오차 개선 방법. 조명·전기설비학회논문지, 32(7), 45-50

이용정보
(Accessed)

군산대학교
203.234.58.***
2021/01/06 17:14 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s)and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s)for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2018) 32(7) : 45～50
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2018.32.7.045 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 32-7-7

Look-up table 기반 PMSM 제어시 최종 출력 데이터 선형 보간 오차 개선 방법

(Final Output Data Interpolation Error Improvement for Look-up Table Based PMSM Control Method)

이정효*
(Jung-Hyo Lee)

Abstract

This paper proposes a novel linear interpolation method for improving final output data interpolation error appliable in look-up table based PMSM drive. Conventional linear interpolation method is generally 2D-Interpolation method which has two input parameters. This 2D-Interpolation method uses constant unit torque for reducing DSP processing time, it has a problem when the interpolation process is performed with final torque output, interpolated output can not follow the torque reference. In this paper, a modified conventional interpolation method is proposed to remove torque control error of final torque output data.

Key Words : Look-up table based PMSM drive, 2D-Interpolation, Interpolation error

1. 서 론

최근에 차량용 전동기로 적은 체적의 높은 출력을 갖는 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM) 구동 시스템이 적용되고 있다.

이러한 PMSM 구동 시스템의 차량 적용을 위해 사용자, 혹은 환경 변화에 대한 제어 입력에 따른 적절한 데이터를 Look-up table에 저장하여 구동시키는 방법이 일반적으로 활용되고 있다. 그러나 Look-up table에 저장할 수 있는 데이터는 한계가 있으며, 모든 환경 입력에 대한 적절한 데이터를 저장할 수 없다. 또한 차량안전기준이 점점 높아짐에 따라 구동분야에 활용할 수 있는 메모리양 또한 점점 제한되고 있는 실정이다.[1]-[7]

이러한 문제점을 해결하기 위해, 기존에는 2D-Interpolation 기법을 활용하여 저장되지 않은 입력이 들어왔을 경우에도 이를 적절히 보간하는 방법을 활용해 왔다. 2D-Interpolation 기법은 두 개의 입력 파라미터 값에 따라 저장된 데이터의 선형 보간을 수행하는 방법으로써, 데이터와 데이터 사이에 있는 입력 파라미터값에 대해서도 적절한 출력데이터를 발생시킨다.[5]

한편 기본적으로 Look-up table에 저장되어 있는

* Main author : Kunsan National Univ. Assistant Prof.
※개인정보 표시제한
E-mail : jhlee82@kunsan.ac.kr
Received : 2018. 7. 10.
Accepted : 2018. 7. 18.

Copyright ⓒ 2018 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.

군산대학교 | IP:203.234.58.*** | Accessed 2021/01/06 17:14(KST)

각각의 데이터는 그에 따른 주소값을 갖는다. 이러한 주소값은 일반적으로 정수형태(Integer)의 값을 갖기 때문에, 저장되는 데이터는 고정 단위값의 정수 배율에 해당하는 조건의 값을 저장하는 것이 일반적이다.

그러나 토크에 대한 데이터가 각 단위 값의 배수로 저장되어 있다고 할 경우, 실험적으로 측정된 최대 토크값이 단위 토크 값의 배수로 저장될 가능성은 거의 없다. 특히 약자속 구동 영역에서의 토크제어를 수행하는 경우, 정토크 영역에서의 최대토크 값과 약자속 구동 영역의 최대토크는 상이할 수 밖에 없다. 이러한 원인으로 인해, 최대토크 출력 데이터 구간에서 입력 파라미터에 대한 2D-Interpolation을 적용할 때에는 지령토크와 출력토크간에 보간오차가 발생한다.

기존에는 이러한 문제를 해결하기 위해서 입력처리가 가능한 토크 지령을 토크 데이터가 정수배로 저장되어 있는 부분으로 제한하였으나 이는 전동기 출력을 감소시키는 문제점이 있다. 따라서 본 논문은 최대출력 지점에서의 선형보간 오차를 개선하기 위한 새로운 선형보간기법을 제시한다.

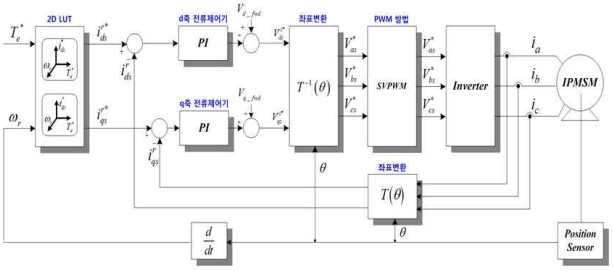

Fig. 1. Look-up Table based torque control block diagram

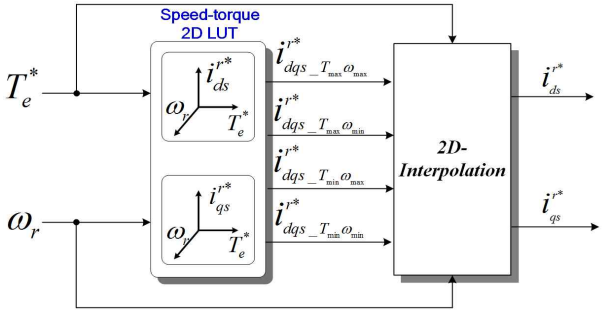

Fig. 2. 2D-Interpolation method

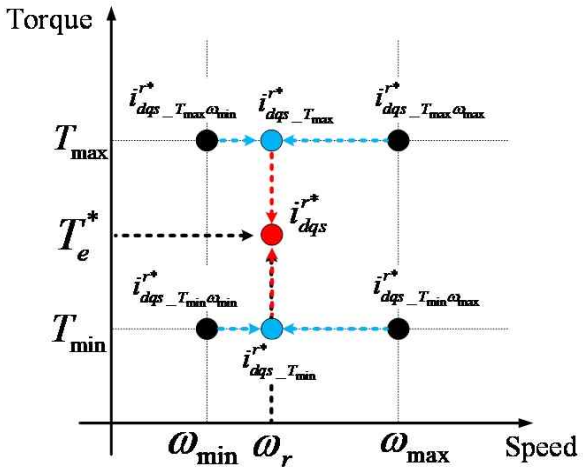

Fig. 3. Interpolation data acquisition by 2D-Interpolation

2. 최종 토크 출력 데이터의 선형 오차 발생 원인

그림 1은 Look-up Table 기반의 PMSM 구동 방법을 나타내고 있다. 기존의 Look-up Table 기반의 PMSM 기법은 크게 속도-토크 2차원 Look-up Table을 이용한 방법과 자속-토크 2차원 Look-up Table을 이용한 방법이 존재한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 좀 더 이해가 쉬운 속도-토크 2차원 Look-up Table을 이용한 방법을 통해 최종 토크 출력 데이터의 선형 오차 발생 원인을 분석하려 한다.

서론에서 설명하였듯이, 모든 속도-토크 지령에 적합한 데이터를 저장하는 것은 불가능함으로, 각 속도, 토크 지령에 따라 그림 2처럼 2D-Interpolation 보간 기법을 적용한다. 적용되는 선형보간 수식은 다음과 같다.

$$f(x) = f(x_1) + \left(\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right) \cdot (x - x_1) \quad (1)$$

여기서 $f(x)$는 보간된 출력이며, x_2와 x_1은 각각 입력 파라미터에 대한 올림, 내림 값, $f(x_2)$, $f(x_1)$은 각각 올림, 내림 파라미터에 따른 저장된 데이터값, 그리고, x는 입력 파라미터 값이다. 변수에 대한 나눗셈

군산대학교 | IP:203.234.58.*** | Accessed 2021/01/06 17:14(KST)

연산은 마이크로프로세서의 연산에 부담이 되므로, 이를 고정값으로 처리하면 식 (1)은 다음과 같이 변형된다.[9]

$$f(x)=f(x_1)+\left(\frac{f(x_2)-f(x_1)}{x_{unit}}\right)\cdot(x-x_1) \tag{2}$$

그림 3은 2D-Interpolation을 이용하여 보간데이터를 획득하는 방법에 대해 도시하였다. 현재 속도와 토크 지령이 입력되면, Look-up Table에 단위토크, 단위속도에 따라 저장되어 있는 값들 중에 입력된 파라미터에 대한 올림 데이터와 내림 데이터를 출력하게 된다. 이를 아랫 첨자기호 max, min에 따라 구분하였다. 속도, 토크 두 개의 파라미터 입력이므로 각각의 올림, 내림데이터를 출력하게 되면 4개의 데이터를 얻을 수 있으며, 이는 그림 3의 검은색 점으로 표현하였다. 이를 먼저 속도에 대한 선형보간을 수행한 후 얻은 두 개의 $i^{r*}_{dqs_T_{\max}}, i^{r*}_{dqs_T_{\min}}$ 결과값을 마지막으로 토크에 대해 선형보간하게 되면 붉은색 점의 최종보간된 dq축 전류지령을 얻을 수 있다. 토크 값에 대한 보간 dq축 전류데이터를 출력할 경우 식 (2)는 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$i^{r*}_{dqs}=i^{r*}_{dqs_T_{\min}}+\frac{i^{r*}_{dqs_T_{\max}}-i^{r*}_{dqs_T_{\min}}}{T^{unit}_e}(T^*_e-T_{\min}) \tag{3}$$

식 (3)을 살펴보면 Look-up Table에 저장되어 있는 전류데이터는 토크지령의 배수에 따라 적용되어야만 한다. 토크지령에 따른 최대토크 출력을 얻기 위해서는 식 (3)의 단위토크는 다음과 같이 설정되어야 한다.

$$T^{unit}_e=T^{\max}_e/k_{\max} \tag{4}$$

여기서 $T^{\max}_e$ 는 최대토크출력, $k_{\max}$ 는 토크축 최대 허용 메모리 수를 나타낸다.

하지만 그림 4 (a)를 살펴보면 정토크 영역에서의 최대출력토크는 일치하는 값을 얻을 수 있지만, 약계자 영역에서의 최대출력토크는 단위토크의 정수배와 일치하지 않음을 알 수 있다.

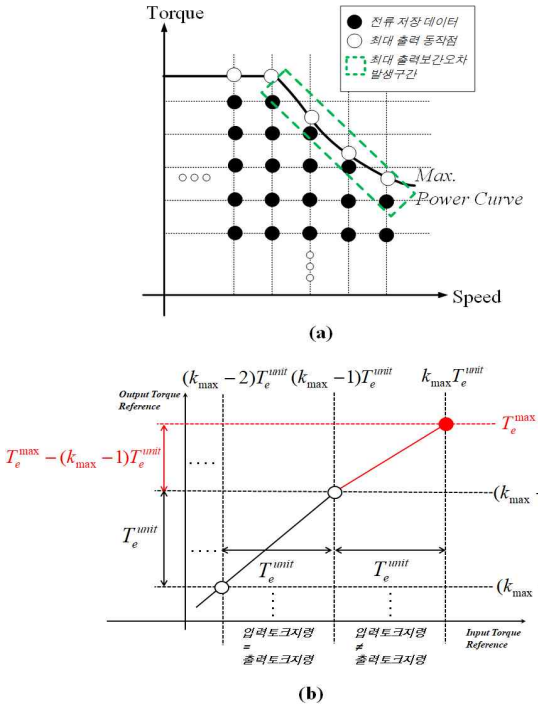

Fig. 4. Interpolation error in maximum torque control
(a) The region occurring interpolation error
(b) The cause of interpolation error

그림 4 (b)에서는 이러한 오차를 좀 더 상세히 나타내고 있다. 입력토크지령은 단위토크에 대한 정수배인 $k_{\max}T^{unit}_e$ 이지만, 실제 출력은 약계자 구동 영역에서의 특정 속도의 최대출력토크를 출력하며, 따라서 출력토크는 입력토크지령 대비 $T^{\max}_e-(k_{\max}-1)T^{unit}_e$ 의 토크제어오차가 나타난다.

3. 최종 토크 출력 데이터의 선형 보간 오차 개선 방법

전 장에서 설명한 최종 토크 오차를 개선하기 위해서 본 논문에서는 기존의 2D-Interpolation 기법을 수정하였다. 먼저 기존의 2D-Interpolation 기법을 순서도로 표현하면 그림 5와 같다.

여기서 속도에 대한 보간법 적용과 토크에 대한 보

군산대학교 | IP:203.234.58.*** | Accessed 2021/01/06 17:14(KST)

간법 적용은 바꾸어 적용하여도 일치된 데이터를 얻는다. 그림 6은 약계자 영역에서 최대토크가 가변되는 경우의 dq축 전류데이터를 나타낸다. 그림 3과 달리 최대 토크값이 변동되는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 두 가지 문제점을 해결해야 하는데, 첫 번째는 약계자 영역에서의 최대 출력 토크를 전류맵에 저장된 토크값과 일치하도록 변경시켜야 하고, 두 번째는 2D-Interpolation이 적용될 때의 보간 오차를 제거하기 위해 이에 적절한 단위토크로 변경시켜야 한다.

그림 7은 최종 출력 데이터의 토크제어오차를 보정하기 위한 수정된 2D-Interpolation 기법의 순서도 이

Table. 1. Motor parameters

극 수	8
상저항[mΩ]	30
Ld[mH]	0.303
Lq[mH]	0.907
상역기전력[Vrms/krpm]	120
정격 DC-link 전압[Vdc]	208
토크[Nm]	79
정격속도[rpm]	2400
최대속도[rpm]	15000
상전류최대치[Apk]	160

다. 먼저 최대출력토크 데이터를 변경하기 위해 각각의 속도에 대한 최대출력토크 데이터를 테이블화 하였다. 이를 추출하기 위해서는 토크지령 입력이 최대출력토크 지령 구간인지 파악할 수 있는 지령토크영역 확인 블록이 필요하다. 이는 단위토크로 나누어 소수점 올림,내림을 거친 메모리 주소값 정보를 통해 알 수 있다. 두 번째로 보간 오차를 제거하기 위해 마찬가지로 최대출력 토크값이 필요한지 지령토크영역을 확인한 후, 이에 적절한 단위 토크값을 출력할 수 있는 블록도를 적용하였다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 2D-Interpolation 방법은 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 표 1은 테스트 모터

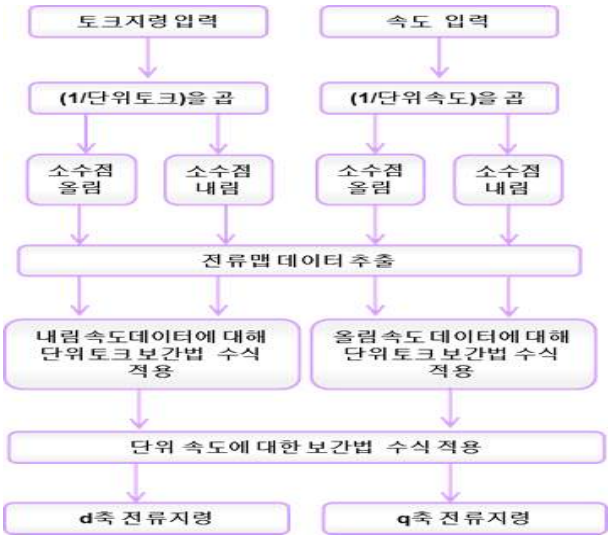

Fig. 5. Flow chart of conventional 2D-Interpolation

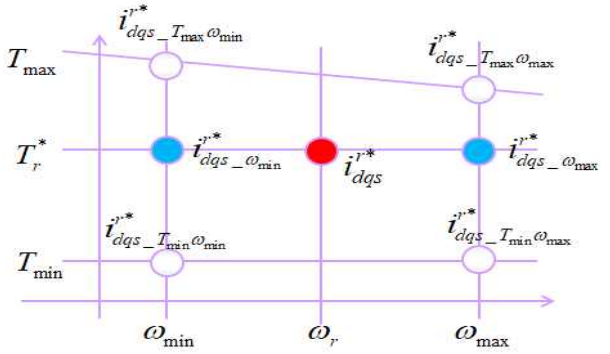

Fig. 6. Data acquisition of 2D-Interpolation in field weakening region

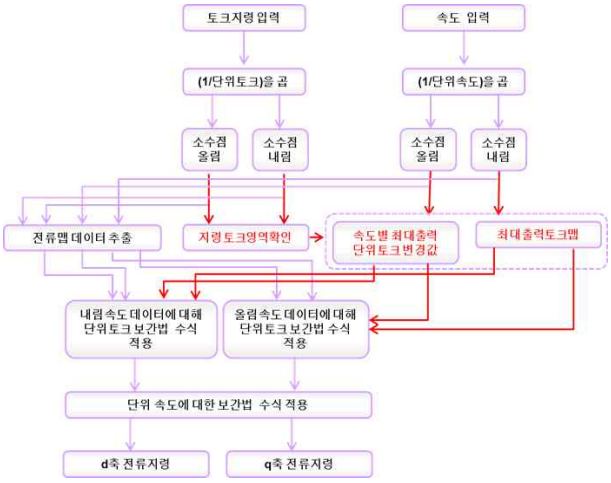

Fig. 7. Proposed 2D-Interpolation flow chart

군산대학교 | IP:203.234.58.*** | Accessed 2021/01/06 17:14(KST)

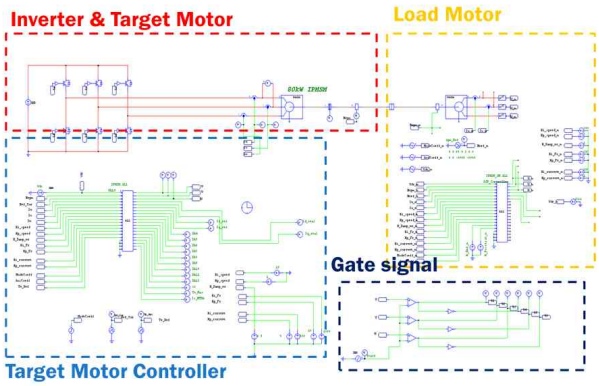

Fig. 8. PMSM simulation circuit

의 파라미터이며, 그림 8과 같은 PMSM 시뮬레이션 회로도를 통하여 제안된 알고리즘을 검증하였다.

그림 9는 표 1의 파라미터를 바탕으로 dq축 전류맵을 추출한 결과이다.[7] 속도가 증가할수록 약계자 영역에서 q축전류는 감소하고, d축전류는 음의 값으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 단위토크는 정토크영역 최대토크를 기준으로 하여 7.9Nm로 설정하였고, 단위속도는 500rpm으로 설정하였다. 그림 10은 약계자 구동영역인 3000rpm에서 기존의 2D-Interpolation 기법을 사용하였을 때의 토크제어 오차를 나타낸다. 그림을 살펴보면, 3000rpm의 최대토크인 68.3Nm의 토크출력을 얻으려면 토크지령을 71.53Nm를 인가하여야 하며, 최대출력토크 영역인 63.58Nm에서 부터 최대출력토크까지 보간오차가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 제안된 방법을 통하여 토크제어를 수행한 결과이다. 그리 10과 달리 제어오차가 발생되지 않는 것을 알 수 있으며, 최대출력토크 이상의 지령이 인가되는 경우 3000rpm에서 출력할 수 있는 최대토크가 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 Look-up table 기반의 PMSM 구동시 발생하는 최종 출력 데이터의 선형보간오차를 개선하기 위한 새로운 선형보간방법을 제안한다. 기존의 PMSM을 구동시키기 위한 선형보간 방법은 일반적으

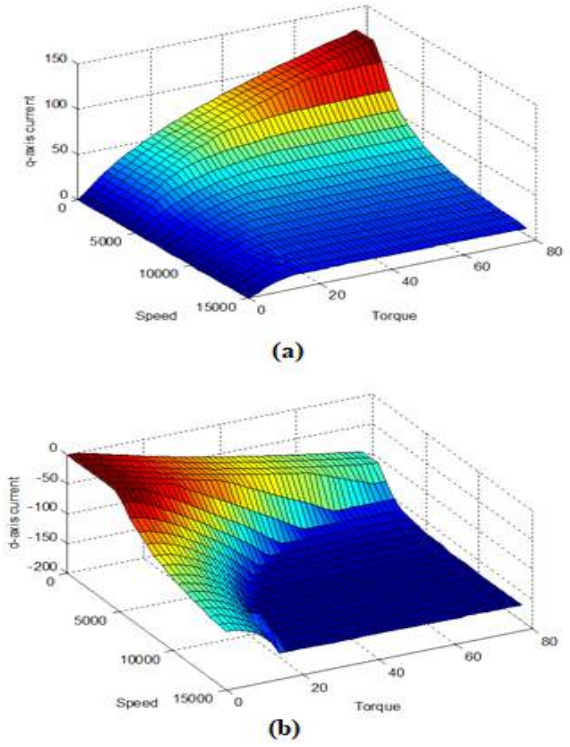

Fig. 9. dq-axis current maps (a) q-axis current map (b) d-axis current map

로 두 개의 조건을 입력으로 하는 2D-Interpolation 기법이 일반적으로 활용된다. 이러한 2D-Interpolation 방법은 DSP의 제어 연산량을 줄이기 위해 고정 단위 토크를 사용하는데, 최종 토크 출력값을 기존의 방법으로 선형보간할 시에는 토크지령대로 제어가 되지 않는 문제점이 있다.

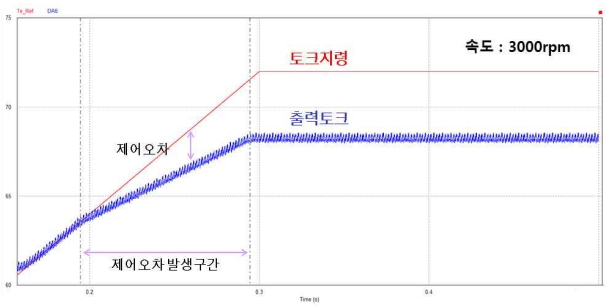

Fig. 10. Torque control simulation using conventional 2D-Interpolation method

군산대학교 | IP:203.234.58.*** | Accessed 2021/01/06 17:14(KST)

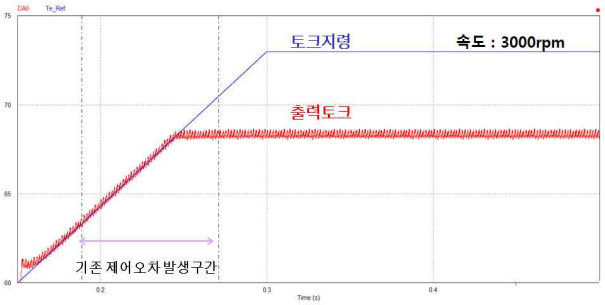

Fig. 11. Torque control simulation using proposed 2D-Interpolation method

본 논문에서는 이러한 최종 토크 출력 데이터의 토크 제어 오차를 제거할 수 있도록 기존의 2D-Interpolation 기법을 수정한 새로운 선형보간기법을 제안하였고, 이를 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 토크 제어오차가 줄어들었음을 확인하였다.

Acknowledgement

"이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2018R1C1B6008895)"

Acknowledgement

"이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1A6A1A03013567)"

References

[1] Y. Kusaka, E, Yamada, and Y. Kawabata, "Method and Apparatus for Driving and Controlling Synchronous Motor using Permanent Magnets as its Field System," US Patent 55169995, Oct, 1996.
[2] JaeHyuk Lee, JungHyo Lee, JinHo Park, ChungYuen Won, "Field-weakening strategy in condition of DC-link voltage variation using on electric vehicle of IPMSM," IEEE-Conf. Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp.1-6, Aug. 2011.
[3] Yang Nanfang, Luo Guangzhao, Liu Weiguo, Wang Kang, "Interior permanent magnet synchronous motor control for electric vehicle using look-up table," IEEE-Conf., Electrical Machinesand Systems(ICEMS), pp.1015-1019, Jun.2012.
[4] Tae-Suk Kwon, Gi-Young Choi, Mu-Shin Kwak and Seung-Ki Sul "Novel Flux-Weakening Control of an IPMSM for Quasi-Six-Step Operation," IEEE-Trans. Ind. Appl., vol 44, no. 6 pp.1722-1731, Nov. 2008.
[5] Bing Cheng, Tesch, T.R., "Torque Feedforward Control Technique for Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE-Trans. Ind. Elect., vol 57, no. 3, pp.969-974, Mar. 2010.
[6] J. M. Kim and S. K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, no. 1, pp.43-48, Jan./Feb.1997.
[7] Jung-Hyo Lee,Chung-Yuen Won, "A Performance Improvement Method of PMSM Torque Control Considering DC-link Voltage Variation," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 28(11), 2014, 112-122

Biography

Jung-Hyo Lee

He received the B.S. degree in electrical engineering from Konkuk University, Seoul, Korea, in 2006, and the M.S. and the Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 2008 and 2013, respectively. From 2013 to 2016, He was a senior researcher of automotive component R&D Team in LG Innotek. From 2016, he has been a assistant professor in Kunsan national university. His research interests include converters and inverters for motor drive application.

군산대학교 | IP:203.234.58.*** | Accessed 2021/01/06 17:14(KST)