

고조파감소 및 역률개선을 위한 SRM 구동시스템에 관한 연구

(SRM Drive System with Reduced Harmonics and Improved Power Factor)

申奎宰*, 權營顏*, 林根熙**

(Kyoo-Jae Shin, Young-Ahn Kwon, and Guen-Hie Rim)

요 약

스위치드 리럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 회전자 관성이 작으며 단위체적당 출력비가 큰 장점을 갖지만, 리럭턴스 토크를 극대화하기 위한 불연속여자로 인하여 전원입력측 전류에 고조파를 발생하고 역률이 낮은 특성을 가진다. 그리고 고조파전류는 계통에 영향을 미치게 되어 전기·전자기기등에서 오동작의 원인이 되고, 계통선로의 손실이 커지며 공급전원의 외형이 커지는 문제를 발생한다. 본 연구에서는 입력측 전류의 역률과 고조파 문제를 개선하기 위하여 역률보상 회로를 가지는 스위칭 전력컨버터, 속도명령에 의해 dc-링크 전압이 결정되는 DC/DC 컨버터 및 전류초평 전압형 인버터로 구성된 스위치드 리럭턴스 전동기의 구동시스템을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 구동시스템의 성능을 확인하고 입력측 전류의 고조파와 역률이 크게 개선됨을 검증하였다.

Abstract

Switched reluctance motor(SRM) has the advantages of simple structure, low rotor inertia, and high power rate per unit volume. However, SRM has the disadvantages of high current harmonics, and low power factor because of the discontinuous excitation of pulse type. The harmonics brings about the distortion and loss of power system, and brings about the incorrect operation of electronic system. This paper investigates the SRM drive system with the reduced harmonics and improved power factor. The system consists of the switching power converter with power factor correction(SPC-PFC), DC/DC converter and 3-phase inverter. The performances in the proposed system are verified through the simulation and experiment.

I. 서 론

스위치드 리럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 회전자에 권선이나 영구자석이 없으므로 제작비용이 저렴하고 회전자 관성이 작으며 단위

체적당 출력비가 큰 점등 여러가지 장점을 가지는 전동기이다.^[1~4] 그러나 SRM은 리럭턴스 토크를 극대화하기 위하여 불연속 여자방식을 취하므로 교류입력측에 고조파전류를 발생시키는 단점을 가진다. 이러한 고조파전류는 계통에 영향을 미치게 되어 전기·전자기기등에서 오동작의 원인이 되고, 계통선로의 손실이 커지며 공급전압의 외형이 커지는 등의 문제를 야기한다. 또한 최근에 미국과 유럽에서 이에 대한 대책으로서 IEEE-519와 IEC-555에서와 같이 고조파에 대한 기준을 강화하고 있다.^[5,6] 이에 따라 고조파 감소에 대한 연구가 대두되고 있으며 SRM 구동에서도 이에

* 正會員, 釜山大學校 電氣工學科

(Pusan Nat'l Univ., Dept. of Elec. Eng.)

** 正會員, 韓國電氣研究所

(Korea Electrotechnology Res. Inst.)

接受日字: 1997年5月13日, 수정완료일: 1997年8月4日

관한 연구가 이루어지고 있다.^[7~9] 본 논문에서는 SRM 구동시스템에서 나타나는 고조파를 감소하고 역률을 개선하는 방법을 연구한다. SRM 구동시스템을 위해 설계한 컨버터는 능동 역률제어로서 AC/DC 컨버터의 입력전류를 입력전압과 동상인 정현파로 만들어 역률을 향상시키고 고조파를 감소시켜 입력전류의 왜형을 억제한다. 본 논문에서 제안한 역률개선회로를 가지는 스위칭 전력컨버터(Switching Power Converter with Power Factor Correction, SPC-PFC)는 시뮬레이션과 실험을 통하여 다이오드 브리지 정류기(Diode Bridge Rectifier, DBR)와 비교분석이 수행되며 비선형특성 및 고조파가 심한 SRM의 구동시스템에서도 입력측 전원의 고조파와 역률이 개선됨을 검증한다.

II. SRM 구동시스템

가변속 SRM에 대한 입력측 전원의 고조파 감소 및 역률개선을 위해서 그림 1과 같은 SPC-PFC를 가지는 SRM 구동시스템을 구성하였다. 이 시스템은 PFC를 가지는 AC/DC 부스트 컨버터, 속도명령에 의해 dc-링크 전압이 결정되는 DC/DC 컨버터, 그리고 위치 및 전류초핑 신호에 의해 SRM의 상권선전압을 인가하는 3상 인버터로 구성된다. 또한 보호회로로서 전동기 감속시 발생하는 순간적인 dc-링크 전압 상승을 감지하여 과전압 상승시 또는 dc-링크 과전류 발생시 다이내믹 제동을 수행하도록 한다.

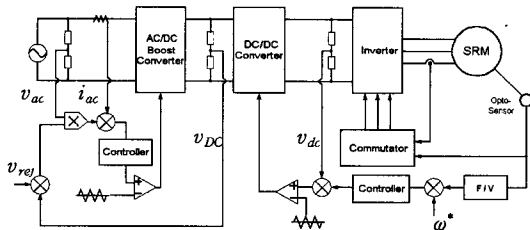


그림 1. SPC-PFC를 가지는 SRM 구동시스템
Fig. 1. SRM drive system with SPC-PFC.

그림 2는 본 논문에서 사용되는 3상, 12/8극, 10마력 SRM의 단면 및 a 상에 대한 스위칭 회로도이다. 일반적으로 SRM은 상권선 상호간의 상호자속이 무시되는 구조로 설계되어 상권선 상호간에 결합이 없는 간단한 방정식이 구성된다. 그러나 SRM은 에너지 이

용율등 여러가지 장점으로 자기포화 영역에서 운전을 하게되어 전압방정식의 파라미터가 회전자의 위치 및 상전류의 함수가 된다.^[4] 비선형 SRM에서의 전압방정식 및 발생토크는 식(1) 및 (2)와 같다.

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \tag{1}$$

단, v : 상전압, R : 상저항, i : 상전류,
 λ : 상권선 쇄교자속, θ : 회전자 위치각

$$T(i, \theta) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \lambda(i', \theta) di' \tag{2}$$

단, T : 발생토크, W_c : 코에너지

따라서 SRM의 토크는 자기회로 및 상전류의 크기에 의해 결정된다. 상전류를 생성하는 상권선의 여자방식으로는 초핑 여자방식과 싱글펄스 여자방식이 있다. 이와 같은 여자방식에서 인버터 동작은 Q_{AH} 과 Q_{AL} 이 ON 상태인 상전류 증가 모드, Q_{AL} 과 D_{A1} 이 ON 상태인 상전류 완감모드 및 D_{A1} 과 D_{A2} 가 ON 상태인 상전류 급격감소 모드 등으로 운전된다.

이상에서 SRM은 포화영역에서 운전함으로 비선형이 되며, 또한 리터턴스 토크를 극대화하기 위하여 불연속 여자방식을 취하므로 전력변환이 필요하고 교류 입력측에 고조파를 발생시킨다.

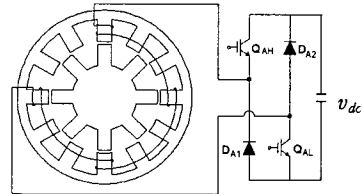


그림 2. SRM 단면과 a상 스위칭 회로도
Fig. 2. Cross section of SRM and per phase switching circuit.

III. SPC-PFC 설계

일반적으로 컨버터에 적용되고 있는 그림 3(a)와 같은 DBR은 안정된 직류전압을 얻기 위해서 대용량의 커패시터와 수동필터를 사용하고 있다. 이러한 방식은 대용량의 커패시터와 인덕터를 필요로 하므로 역률저하 및 비용과 설치 측면에서 부담이 된다. 본 논문

서는 그림 3(b)와 같은 SPC-PFC를 제안한다.

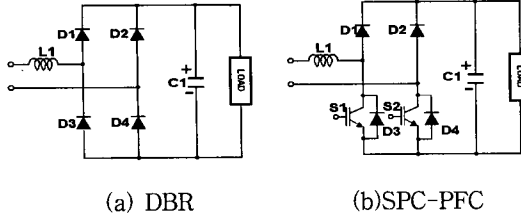


그림 3. AC/DC 컨버터
Fig. 3. AC/DC Converter.

제안된 컨버터의 동작모드는 스위칭 소자 S_1 과 S_2 의 동작상태에 따라 다음과 같이 되며, 그림 4는 각 동작모드에서의 회로도이다.

모드 1 : 입력전원이 정극성 일때 S_1 이 턴-온되고 S_2 가 턴-오프 상태가 되면, S_1 과 D_4 를 통하여 인덕터에는 자기에너지가 저장되며 전압방정식은 식(3)과 같다. 이때 D_1 과 D_2 는 역바이어스 상태가 되므로 dc-링크전압 v_{DC} 는 부하에 인가된다.

$$v_{ac} - L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = 0 \quad (3)$$

모드 2 : 입력전원이 정극성 일때 S_1 이 턴-오프이고 S_2 가 턴-오프 상태가 되면, D_1 과 D_4 를 통하여 인덕터 전류 i_{L1} 이 C_1 과 부하에 공급되며, 전압방정식은 식(4)와 같다.

$$v_{ac} - L_1 \frac{di_{L1}}{dt} - v_{DC} = 0 \quad (4)$$

모드 3 : 입력전원이 부극성 일때 S_1 이 턴-오프이고 S_2 가 턴-온 상태가 되면, S_2 와 D_3 를 통하여 인덕터에 자기에너지가 저장되며 전압 방정식은 식(3)과 같다. 이때 D_1 과 D_2 는 역바이어스 상태가 되므로 dc-링크전압 v_{DC} 는 부하에 인가된다.

모드 4 : 입력전원이 부극성 일때 S_1 이 턴-오프이고 S_2 가 턴-오프 상태가 되면, 다이오드 D_2 와 D_3 를 통하여 인덕터 전류 i_{L1} 이 식(4)와 같이 C_1 과 부하에 공급된다.

여기에서 입력측 기본파 전류 I_{ac1} 는 다음과 같다.

$$I_{ac1} = \frac{V_{ac} - V_{c1}}{j\omega L_1} \quad (5)$$

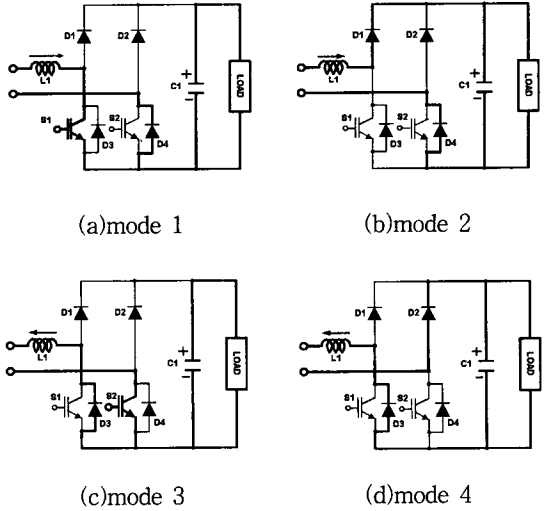


그림 4. SPC-PFC 동작모드
Fig. 4. Operating modes of SPC-PFC.

$$I_{ac1} \angle \phi = \frac{V_{ac} \angle 0^\circ - V_{c1} e^{-j\theta}}{j\omega L_1} \quad (6)$$

$$I_{ac1} = \sqrt{\frac{(V_{ac} - V_{c1} \cos \phi)^2 + (V_{c1} \sin \phi)^2}{(\omega L_1)^2}} \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_{c1} \sin \phi}{V_{ac} - V_{c1} \cos \phi} \quad (8)$$

단, V_{c1} 는 컨버터 전압의 기본파 성분이다. I_{ac1} 과 ϕ 는 V_{c1} 과 ϕ 의 함수이기 때문에 입력측 기본파 전류 I_{ac1} 의 크기와 위상은 V_{c1} 과 ϕ 에 의해서 가변될 수 있다. 따라서 S_1 과 S_2 의 스위칭 신호를 제어함에 의하여 V_{c1} 과 ϕ 가 조정되고 결국 i_{ac} 의 위상 지연 및 외형이 제거될 수 있다.

이상에서 기술한 이론을 바탕으로 하여 그림 5와 같은 PFC 제어회로를 구성한다. SPC-PFC의 동작원리는 그림 5에 제시된 바와 같이 입력 제어신호로서 1차측 dc-링크 측정전압 v_{DC} 와 dc-링크 지령값 v_{ref} 의 차와 스케일된 입력측 전압신호 v_{ac} 가 곱해지며, 이 전류명령값 i_{com} 과 입력전원의 측정전류 i_{ac} 의 전류오차신호 i_{err} 는 PI 제어기를 거쳐서 삼각파 PWM에 의해 S_1 과 S_2 의 게이트를 구동하게 된다. 즉 입력전류를 입력전압과 동상인 정현파로 만들어 역률을 향상시키고, 고조파전류를 감소시키도록 출력전압이 조정된다.

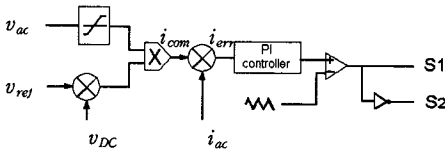
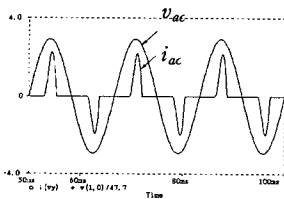


그림 5. PFC 제어회로
Fig. 5. Control circuit of PFC.

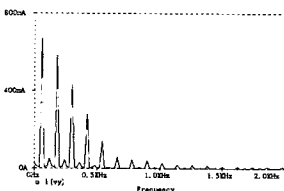
IV. 시뮬레이션

제안된 SPC-PFC와 단순한 DBR의 역률과 고조파를 비교 검토하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 제안된 SPC-PFC와 DBR을 각각 적용한 SRM 구동시스템에서 수행되었으며 정상상태에서의 입력측 전류에 대한 고조파와 역률을 비교하였다

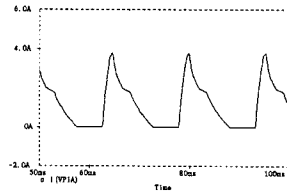
그림 6과 그림 7은 SRM이 500rpm의 속도로 동작할 때 DBR과 SPC-PFC를 각각 적용한 SRM 구동시스템의 시뮬레이션 결과이다. 그림 6(a)와 (b)는 DBR을 적용한 경우로서 입력전류파형 및 고조파성분을 나타내며 그림 6(c)는 SRM의 상전류파형을 나타낸다. 그림 7은 제안된 SPC-PFC를 적용한 경우로서 그림 7(a)와 (b)는 입력전류파형 및 고조파성분을 나타낸다. 여기에서 전압과 전류가 거의 동상이고 기본파를 제외한 상위 차수 고조파가 제거되었음을 알 수 있다. 그림 7(c)는 이경우에 SRM 상전류파형을 나타낸다.



(a) input current i_{ac} and input voltage v_{ac}

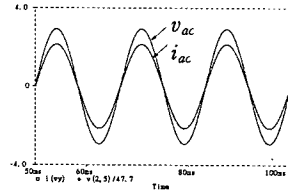


(b) spectra of input current i_{ac}

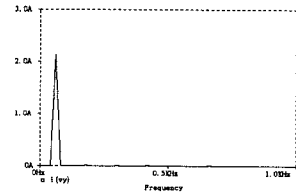


(c) phase current i_p

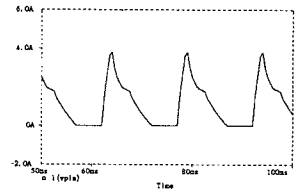
그림 6. DBR을 적용한 시뮬레이션
Fig. 6. Simulation in case of DBR.



(a) input current i_{ac} and input voltage v_{ac}



(b) spectra of input current i_{ac}



(c) phase current i_p

그림 7. SPC-PFC를 적용한 시뮬레이션
Fig. 7. Simulation in case of SPC-PFC.

정상상태에서 입력전류 dc성분 I_o , 기본 입력전류 실효치 I_1 , 전체 고조파 외형률 THD, 고조파 입력전류 실효치 I_h , 입력전류 실효치 I_s , 지연각 ϕ_1 와 역률 PF에 대한 각각의 시뮬레이션결과를 표 1에 제시하였다. 여기에서 입력전류 실효치 및 역률은 식(9) 및 (10)과 같이 정의된다.

$$I_s = \sqrt{I_o^2 + I_1^2 + I_h^2} \tag{9}$$

$$PF = \frac{I_1}{I_s} \cos \phi_1 \tag{10}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{[1 + (THD/100)^2]}} \cos \phi_1$$

단, $THD[\%] = \frac{I_h}{I_1} \times 100$

표 1에서 SPC-PFC를 적용한 구동시스템의 역률 및 고조파성분이 크게 개선됨을 나타내고 있다.

표 1. DBR과 SPC-PFC의 성능비교
Table 1. Performances of DBR and SPC-PFC.

구 분	DBR	SPC-PFC
I_1	0.47 [A]	1.51 [A]
THD	91.5 [%]	1.3 [%]
I_h	0.43 [A]	0.02 [A]
I_s	0.64 [A]	1.51 [A]
ϕ_1	5.7°	0.0°
PF	0.73	1.0

V. 실험결과 및 검토

실험에 사용된 SPC-PFC를 포함하는 SRM 구동시스템의 주회로는 그림 8과 같다. 인버터는 전류초핑기능을 가진 고전적인 인버터로 구성하였으며, SRM의 부하는 DC 발전기를 결합하여 부하저항을 인가하도록 구성하였다. 한편, SRM은 인가전압에 따라 전동기의 속도가 변동되므로 속도지령치 ω^* 와 측정속도의 오차를 PI제어기로 보상한 전압지령치와 2차측 링크전압 v_{dc} 의 크기를 비교하고 삼각파 PWM에 의해 속도지령에 추종하는 링크전압이 되도록 T_1 의 게이트를 제어한다. 또한 SRM의 순간적인 감속시 발생할 수 있는 인버터단의 전압상승 방지 및 순간적인 돌발 사고로 인하여 인버터의 손상을 방지하기 위하여 그림 9와 같은 보호회로를 구성하였다. 보호회로는 선정한 전력소자 IGBT의 동작범위를 고려하여 전류는 20A, 전압은 600V를 기준값으로 하고 이 기준값 이상으로 동작시는 DC/DC 컨버터가 순간적으로 차단되고 T_2 가 턴-온되어 저항을 통하여 에너지를 방출하도록 하였다.

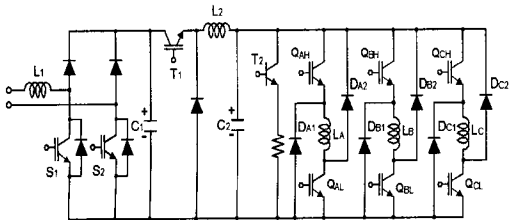


그림 8. SRM 구동시스템의 주회로
Fig. 8. Main circuit of SRM drive system.

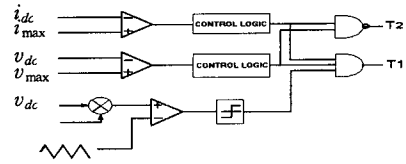
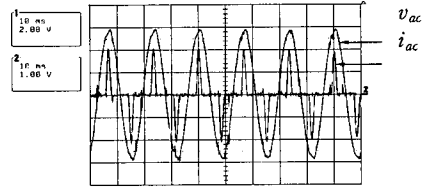
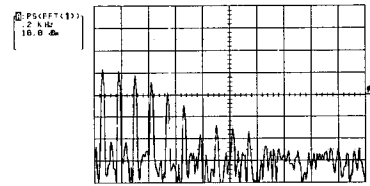


그림 9. DC/DC 컨버터 및 제동의 제어회로
Fig. 9. Control circuit of DC/DC converter and braking.



(a) v_{ac} (47.7V/div) and (i_{ac} 1A/div)



(b) spectra of i_{ac} (10.0dBm)

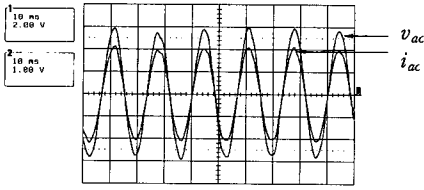
그림 10. DBR을 적용한 실험결과
Fig. 10. Experimental result in case of DBR.

제작한 구동시스템의 입력측 고조파감소 및 역률개선을 검증하기 위하여 무부하와 부하조건에서 각각 실험을 수행하였다. 그림 10은 DBR을 가지는 SRM 구동시스템에서 무부하실험을 수행한 결과이다. 그림 10(a)는 SRM의 운전속도 1650rpm에서의 입력전류 i_{ac} 및 전압 v_{ac} 파형을 나타내며 고조파가 큰 전류파형을 나타내고 있다. 그림 10(b)는 이때의 입력전류 i_{ac} 에 대한 각 차수의 고조파크기를 나타내며, 기본파의 에도 상위차수의 고조파가 크게 나타나고 있다.

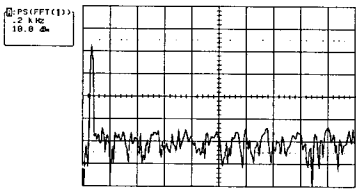
이와 동일한 실험조건에서 제안된 SPC-PFC를 적용한 실험결과는 그림 11과 같으며, 그림 11(a)에서 입력전류 i_{ac} 는 입력전압 v_{ac} 과 동상인 정현파로 개선되었고 그림 11(b)와 같이 고조파가 크게 개선되었음을 알 수 있다. 그림 12는 상기 무부하 실험조건에서 운전된 SRM의 상전압 및 상전류 파형을 나타낸다.

그림 13은 부하조건에서 입력전류 i_{ac} 및 전압 v_{ac} 파형을 나타낸다. 이때 SRM의 운전속도는 700rpm이

며, 부하토크는 20Nm이다. 그림 14는 부하조건에서 SRM의 상전류 i_p 와 입력전류 i_{ac} 의 비교를 나타낸다.

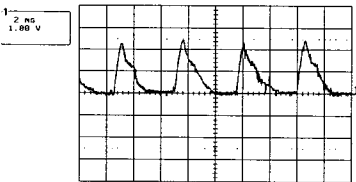


(a) v_{ac} (47.7V/div) and i_{ac} (1A/div)

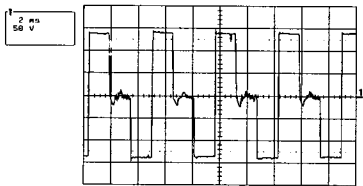


(b) spectra of i_{ac} (10.0dBm)

그림 11. SPC-PFC를 적용한 실험결과
Fig. 11. Experimental result in case of SPC-PFC.

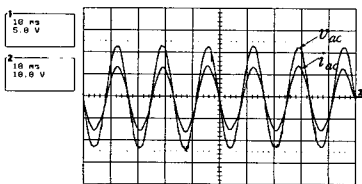


(a) phase current(1.74A/div)

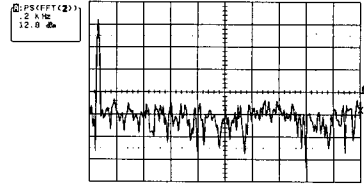


(b) phase voltage(50V/div)

그림 12. SRM의 상전류 및 상전압
Fig. 12. Phase current and voltage of SRM.



(a) v_{ac} (119.2V/div) and i_{ac} (10A/div)



(b) spectra of i_{ac} (12.0dBm)

그림 13. 부하인가시 실험결과(SPC-PFC)
Fig. 13. Experimental result in load(SPC-PFC).

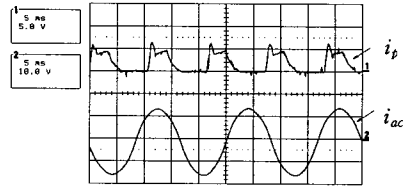


그림 14. 부하인가시 SRM의 상전류(8.7A/div)와 입력전류(10A/div)
Fig. 14. Phase current(8.7A/div) of SRM and input current(10A/div) in load.

VI. 결론

SRM은 구조가 간단하고 회전자 관성이 작으며 단위체적당 출력비가 큰 점등 여러 가지 장점을 갖지만, 리플턴스 토크의 극대화를 위하여 불연속 여자방식을 취하므로 전력변환이 필요하고 교류입력측에 고조파 전류를 발생시키는 단점을 가진다. 본 논문에서는 SRM 구동시스템에서 나타나는 고조파 및 역률을 개선하기 위하여 PFC를 가지는 스위칭 전력컨버터, 속도명령에 의해 dc-링크 전압이 결정되는 DC/DC 컨버터 및 SRM에 전압을 인가하는 3상 인버터로써 구동시스템을 구성하고 PFC에 의한 능동 역률제어를 제안하였다. 제시된 알고리즘에 의하여 입력전류는 입력전압과 동상이 되도록 컨버터의 스위칭 소자를 제어함으로써 입력전류의 외형을 억제하고 역률이 크게 향상되었음을 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 확인하였다. 제안한 SPC-PFC를 가지는 SRM 구동시스템은 SRM이 가지는 단점으로서 고조파 문제 및 낮은 역률 문제를 해결할 수 있으며, IEEE-519와 IEC-555의 설계기준을 만족하는 SRM 구동시스템 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] M.R.Harris and T.J.E. Miller, "Comparison of Design and Performance Parameters in Switched Reluctance and Induction Motors", Int Conf Electric Machines and Drives, pp.303 ~307, 1989.

[2] H.Moghbelli, G.E.Adams and R.G.Hoft, "Performance of a 10HP Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", IEEE, IA-27, No3, pp.531~538, 1991.

[3] Y.A.Kwon and K.Reichert, "Choppingless Operation of a Nonlinear Switched Reluctance Motor", Int Conf on Evlution and Modern Aspects of Synchronous Machines, pp451~454, 1991.

[4] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford Univ. Press, 1993.

[5] IEEE Recommended Practices and Require ments for Harmonic Control in Electric Power Systems, Project IEEE 519, 1992.

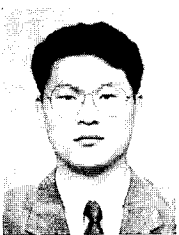
[6] IEC Subcommittee 77A, "Disturbances in Supply Systems Caused by Household Appliance and Similar Electrical Equipment, Part 2 : Harmonics", (Secretariate) 82. Project, Ballot Draft of Proposed New Std., IEC 555-2(EN 60555-2), 1992.

[7] Wen-Inne Tsai, York-Yih Sun and Wue-Shyong Shi도, "Modelling and Control of Single Phase Switching Mode Retifiers with Near-Optimum Dynamic Regulation", IEEE/IECON, pp.501~506, 1991.

[8] G.H.Rim et al., "A Chopping Converter for Switched Reluctance Motor with Unity Power Factor and Sinusoidal Input Current", IEEE/PESC, pp.500~507, 1994.

[9] R.Krishnan and S.Lee, "Effect of Power Factor Circuit on Switched Reluctance Motor Drives for Appliances", IEEE/APEC, pp.83~89, 1994.

저 자 소 개



申 奎 宰(正會員)
 1985년 2월 원광대학교 전자공학과 졸업. 1988년 2월 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업.(공학석사)
 현재 부산대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 순천공업전문대학 제어계측과 교수



權 營 顏(正會員)
 1978년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업.(공학박사)
 1991년 스위스 취리히공대(ETH) 방문교수. 현재 부산대학교 전기공학과 교수

林 根 熙(正會員) 第 33卷 B編 第 12號 參照
 현재 한국전기연구소 전기물리연구팀 팀장

D편에 수록된 논문

1997年 10月

第 34 卷 D編 第 10 號

論 文

(마이크로파 및 電波傳播)

- 마이크로웨이브 이미징에서 위상오차 분산과 코릴레이션 계수와와의 상호관계 姜鳳淳, 楊勳其 (1)
- 정전기 방전에 의한 전자 간섭빈도의 통계적 추정 姜仁鎬, 李昌福, 鄭玉鉉 (7)
- Cellular Phone 용 단일 전원 MMIC Single-Ended 주파수 혼합기 개발
..... 姜賢一, 李尙恩, 吳在應, 吳丞健, 郭明鉉, 馬東星 (14)
- 3dB Coupled Line을 이용한 안정한 RF전력증폭기 설계방법 金善昱, 姜元泰, 姜忠求, 張益洙 (24)
- 유전체로 채워진 유한한 슬롯을 가지는 평행평판 도파관 누설과 안테나 구조에 대한
특성모드 해석 尹利虎, 趙榮基 (32)
- 평행평판 도파관의 윗면에 있는 주기적인 슬롯으로 이루어진 유한한 격자구조에 의한
가우시안 빔의 회절 李鍾益, 趙榮基 (39)
- 접지된 유전체층위에 주기적인 스트립구조로서 구성되어 있는 유한한 격자구조에 의한
가우시안 빔의 회절특성 李鍾益, 趙榮基 (45)
- 모드정합법을 이용한 20 GHz 저손실 이중모드 채널여파기 鄭根旭, 李宰鉉, 柳旻完, 姜馨春 (53)
- 室內 電波 傳播의 時間領域 有限差分法에 의한 계산 許文萬, 白樂俊, 朴恒九, 尹賢普 (60)

[半導體·材料 및 部品]

- 8인치 웨이퍼의 온도균일도향상을 위한 고속열처리공정기의 최적 파라미터에 설계에 관한 연구
..... 崔成圭, 崔鎮榮, 權旭鉉 (68)

(光波 및 量子電子工學)

- LiNbO₃ 전기광학효과의 근사식 도출 및 오차 검토 金永文, 金秀娥, 金昌敏 (77)
- LD Gain-Switching에 의한 초단 광 펄스 발생 해석 金允中, 金東珏, 金昌敏 (85)