

# 전기학회논문지

ISSN 1229-2451

2003  
6

THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

제52권 제6호

## B 전기기기 및 에너지변환시스템부문

### 전기기기

- 247** 전자소자의 3차원 형상최적화를 위한 구조변형 해석을 이용한 새로운 요소망 변형법/  
Yao Yingying · 柳在燮 · 高彰燮 · Xie Dexin
- 254** 정상상태 특성 개선을 위한 단상 영구자석형 동기기의 자기회로 설계/  
吳泳璉 · 南赫 · 鄭承奎 · 洪正杓 · 鄭泰旭 · 白承勉
- 262** 단상 직립 기동형 영구자석 동기기의 회로정수에 따른 특성해석/  
姜圭洪 · 洪正杓
- 271** 고온 초전도 케이블의 전류 분포 및 전기절연 특성/  
金榮錫 · 郭東洵 · 韓哲洙 · 金相賢 · 兵島高太郎
- 278** 위상차(PDOA)를 이용한 열차 위치 감지/  
鄭樂教 · 金榮石
- 286** 고온초전도 벌크 베어링을 사용한 유도 전동기의 특성 시험/  
林炯佑 · 李光淵 · 朴明陣 · 車貴守 · 李志光

### 전력전자

- 291** 전류원 인버터의 병렬운전에 의한 축전지 없는 태양광 시스템의 구성/  
朴晟濬 · 金鍾烜



사단법인 대한전기학회  
THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS



# **THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS**

**June 2003**

SOCIETY OF ELECTRICAL MACHINERY & ENERGY CONVERSION SYSTEMS

**B**

## **Electric Machinery**

- 247** A Novel Mesh Regeneration Method Using the Structural Deformation Analysis for 3D Shape Optimization of Electromagnetic Device/  
Yingying Yao · Jae Seop Ryu · Chang Seop Koh · Dexin Xie
- 254** Design of Magnetic Circuit of Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor to Develop the Characteristics at the Steady State/  
Young-Jin Oh · Hyuk Nam · Seung-Kyu Jung · Jung-Pyo Hong · Tae-Uk Jung · Seung-Myun Baek
- 262** Characteristic Analysis of Single Phase Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Circuit Parameters/  
Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong
- 271** The Characteristics of Current Distribution and Electrical Insulation on High-Tc Superconducting Cable/  
Young-Seok Kim · Dong-Soon Kwag · Chul-Soo Han · Sang-Hyun Kim · Takataro Hamajima
- 278** A Position Detection of Train Using the PDOA(Phase Difference of Arriving)/  
Rag-Gyo Jeong · Young-Seok Kim
- 286** Performance Tests of an Induction Motor with Hexahedron HTS Bulk Bearing/  
Hyoung-Woo Lim · Kwang-Youn Lee · Myung-Jin Park · Guee-Soo Cha · Ji-Kwang Lee

## **Power Electronics**

- 291** Stand-Alone PV System by Parallel Operation Control of Current-Source Inverter without Battery/  
Sung-Jun Park · Jong-Dal Kim



THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS



# 단상 직립 기동형 영구자석 동기기의 회로정수에 따른 특성해석

論 文

52B-6-3

## Characteristic Analysis of Single Phase Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Circuit Parameters

姜 圭 洪\* · 洪 正 杓\*\*

(Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong)

**Abstract** - In this paper, the characteristics of single-phase line-start permanent magnet synchronous motor driven by constant voltage are analyzed on d-q axis vector diagram and compared with that of current controlled motor. The coupled method of symmetrical coordinates and d-q axis voltage equation are applied to the analysis method like the analysis of single-phase induction motor. From the result of the analysis, it is seen that motors driven by constant voltage source have effects on not only the amplitude of current and torque but also current and current phase angle, so overall characteristics such as power factor and load angle are affected by circuit parameters. For precise analysis and design of single-phase line-start synchronous motor, its characteristics should be analyzed on d-q axis vector plan in consideration of the variation of circuit parameters.

**Key Words** : single-phase line start permanent magnet synchronous motor, d-q axis vector diagram, load angle, current phase angle

### 1. 서 론

유도전동기는 전력변환장치 없이 상용 전원으로 기동 및 운전 가능하므로 특히, 단상 전원을 사용하는 가전 분야에는 단상 유도전동기가 널리 이용되고 있다. 그러나, 유도전동기는 여자전류에 의한 공극자속 밀도가 낮고 1차 입력 전류의 상승 및 2차측 동손 등의 현상이 발생한다. 특히 단상 유도전동기는 주권선과 보조권선의 기자력 차에 의한 불평형 자계에 의해 성능은 더욱 저하하고 효율이 떨어지는 단점이 있다[1]-[3]. 이에 반해 영구자석을 계자로 사용하는 동기전동기의 경우 공극자속 밀도가 높고 2차측 동손이 발생하지 않기 때문에 유도전동기에 비해 효율 및 에너지 밀도가 높은 장점을 가지지만 기동을 위해서 별도의 구동장치에 의해 가격상승을 초래하므로 가전 분야에 적용이 미미한 실정이다. 따라서, 단상 전원을 사용하는 가전(家電) 분야 등에 별도의 구동회로 없이 기동 및 고효율 운전 가능한 동기전동기의 개발이 필요하며, 이를 만족할 수 있는 전동기로써 단상 직립 기동형 영구자석 동기전동기(Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor, LSPMSM)의 설계 및 해석 기술의 연구가 강력히 요구되고 있다[4]-[6].

단상 LSPMSM의 고정자는 단상 유도전동기(single-phase induction motor)와 같이 주권선과 보조권선을 가지며 회전자는 기동을 위한 2차측 도체와 정상상태에서는 동기전

동기의 특성을 가지기 위해 영구자석을 가진다. 따라서 단상 유도형 동기전동기는 단상 유도전동기와 같이 주권선과 보조권선의 기자력 차에 의한 불평형 자계로부터 역상분에 의한 슬립이 발생하므로 동기속도로 운전하는 경우에도 2차측 도체에 전류가 유기되어 2차 동손이 발생할 수 있다. 이러한 불평형 자계를 발생하는 전동기의 해석 방법으로 대칭좌표법(method of symmetrical coordinates)을 이용하여 2개의 독립적인 평형전동기로 고려하여 특성해석을 하는 방법들이 이용되고 있다[2],[4]. 즉 불평형 자계가 발생하는 단상 LSPMSM의 정밀 해석 및 설계를 수행하기 위해서는 불평형 자계의 정확한 해석을 통해 주권선과 보조권선의 기자력 및 위상 차를 평형 상태가 되도록 도체 수와 콘덴서 등을 이용한 설계가 주를 이룬다.

그러나, 영구자석이 회전자 내부에 매입된 매입형 영구자석 단상 LSPMSM의 경우 주권선과 보조권선의 기자력 차뿐만 아니라 회전자 자기회로의 구조에 의한 d축과 q축 인덕턴스 차가 발생하고 이로 인해 토크턴스 토크가 전자기적 토크에 중첩되므로 설계 파라미터에 따른 전동기 특성의 분석 및 예측이 매우 복잡해 설계 신뢰성 확보가 어렵다. 또한 d축 및 q축 인덕턴스는 회전자의 극부적 자기회로 포화에 의해 전류의 크기뿐만 아니라 부하각에 따라 급격한 변화가 발생하므로 단상 LSPMSM의 설계 및 해석 시 이러한 파라미터를 고려한 특성해석이 이루어져야 하나, 전류 제어용 전동기의 경우 파라미터 변화에 따른 정토크 및 약제자 운전등의 특성해석에 벡터도를 이용한 연구 결과가 많이 발표된 반면 정전압(constant-voltage) 구동 단상 LSPMSM의 경우 파라미터를 고려한 벡터해석의 연구가 극히 미미하다[8]-[10].

따라서, 본 논문에서는 단상 LSPMSM의 특성 해석 및

\* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 BK 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 12月 13日

最終完了 : 2003年 4月 11日

설계 방법을 벡터 해석을 통해서 제시하였다. 정상상태에서의 특성해석은 대칭좌표법을 이용하여 정상분과 역상분으로 분리하여 해석하였으며 정상분의 임피던스는 d-q축 전압방정식을 이용하여 반복법에 의해 계산하였고, 역상분은 d-q축 임피던스의 평균치로 고려하였다. 이때, d-q축 인덕턴스는 유한요소법을 이용하여 전류 위상각에 따른 인덕턴스를 산정하여 해석에 적용하였다. 또한, 단상 LSPMSM의 설계를 위해서 d-q축 파라미터 변화에 따른 특성 변화를 d-q축 벡터도에서 전압, 전류의 크기 및 전류위상각 개념으로 분석하였고, 회로정수가 특성에 미치는 영향으로부터 정전압 구동 단상 LSPMSM의 효율 및 최대토크 향상을 위한 설계방법을 제시하였다.

## 2. 벡터도를 이용한 단상 LSPMSM의 특성 해석

본 논문에서 해석 대상으로 선정한 단상 LSPMSM의 구조를 그림 1에 나타내었다. 단상 LSPMSM은 구동회로 없이 기동 및 운전 가능하도록 회전자에 유도 기동형 도체와 매입형 영구자석으로 구성되어 있다. 따라서 상용전원을 사용하는 정전압 구동 전동기로서 d-q축 벡터도에서의 전동기 특성은 전류제어용 전동기와 비교하여 해석을 하였다.

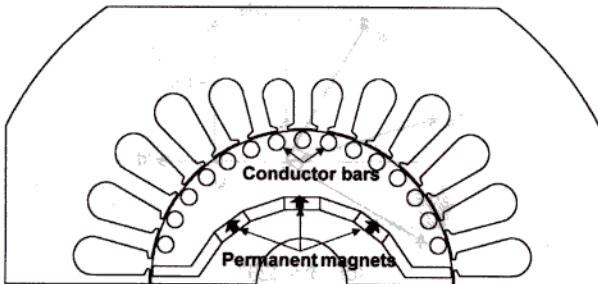


그림 1 단상 LSPMSM의 구조

Fig. 1 The structure of a single-phase LSPMSM

### 2.1 전류 제어용 전동기의 전압-전류 특성

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 토크의 추가적인 발생에 의해 단위전류 당 발생토크가 크고 효율이 높은 장점을 가진다. 따라서 인버터로 구동되는 IPMSM의 경우 구동장치에 의해 전류 크기 및 전류 위상각(current phase angle) 제어를 통하여 단위전류 당 최대토크 운전, 약계자 운전, 단위 역률 및 최대출력 운전과 같이 최적 운전이 가능하다.[8]~[10].

정상상태 운전시 IPMSM의 벡터도를 그림 2에 나타내었다. 여기서,  $V_d$ ,  $V_q$ 는 d-q축 전압,  $E$ 는 상당 무부하 역기 전력,  $I_d$ ,  $I_q$ 는 d-q축 전류,  $\gamma$ 는 전류위상각,  $\delta$ 는 부하각,  $\phi$ 는 역률각을 나타낸다. 회로정수  $X_d$ ,  $X_q$ 는 d-q축 리액턴스,  $R$ 은 권선 저항,  $\beta$ 는 d축과 전류가 이루는 각도를 나타낸다.

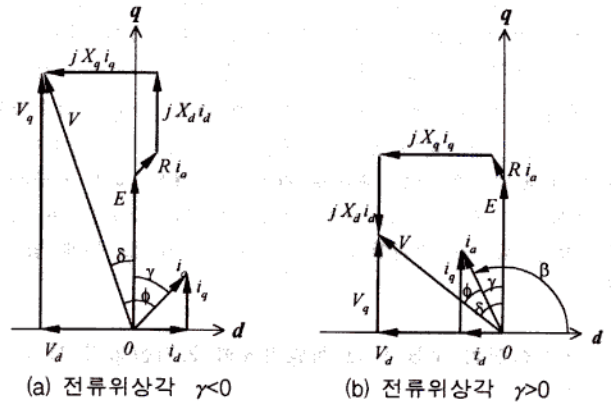


그림 2 정상상태 벡터도

Fig. 2 Vector diagram on steady state

전류제어용 전동기의 경우 일정전류로 운전하면서 q축과 전류가 이루는 각도인 전류 위상각에 따른 특성 변화를 그림 3의 d-q축 벡터도를 통해 나타내었다. 이때, 일정속도로 회전하며 권선 저항에 의한 전압강하는 무시하였으며 전기자 반작용을 고려한 유기전압  $V_0$ 와 토크 방정식을 식 (1)과 (2)에 나타내었다.

$$(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_0}{\omega}\right)^2 \quad (1)$$

$$T = m[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 상수이고  $\psi_f$ 는 영구자석에 의한 쇄교자속이다.

그림 3(a)에서 전류 위상각  $\gamma = -45^\circ$ 인 경우 d축 전류  $i_d$ 에 의한 자속은 총 쇄교자속  $\psi_0$ 를 증가시켜 유기전압이 증가하고, 전압과 전류의 위상차가 증가하여 역률은 감소하

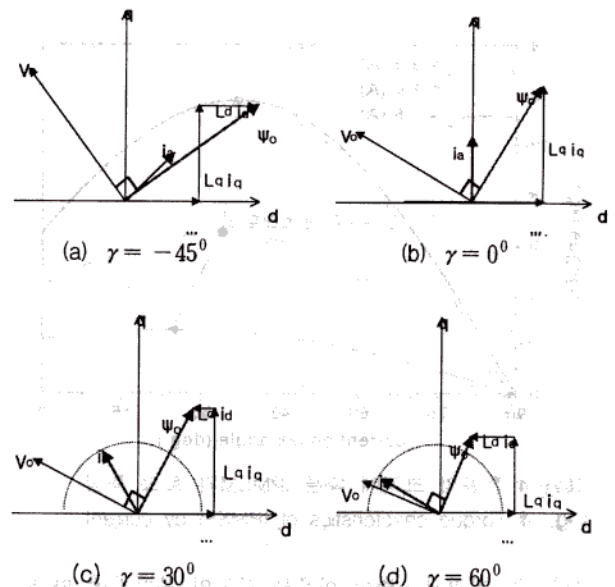


그림 3. 전류 위상각에 따른 전압, 쇄교자속 및 역률 관계  
Fig. 3. Relation of voltage, flux linkage and power factor by current phase angle



며 릴렉턴스 토크는 (-) 토크가 발생하여 발생토크는 감소한다. 전류 위상각이 증가할수록 전압과  $q$ 축이 이루는 각도인 부하각  $\delta$ 이 증가하며 전압과 전류의 위상차가 감소하여 역률은 증가한다. 또한  $i_d$  전류에 의한 자속이 감소하여 유기전압도 감소하며 토크는 릴렉턴스 토크의 중첩으로 증가하게 된다. 즉 전류 제어용 전동기의 경우 전류 위상각을 증가시키면 유기전압은 감소하지만 부하각이 증가하며 역률 및 발생 토크가 증가함을 그림 3의 (c), (d)를 통해 알 수 있다.

## 2.2 정전압 구동 단상 직립기동형 동기전동기 특성

단상 LSPMSM의 구조는 제어용 전동기와 동일하나 제어용 전동기가 인버터를 이용하여 일정 전류를 제어하기 위하여 전압이 가변하는 것과는 달리 인버터를 사용하지 않고 상용 전원을 직접 사용하기 때문에 일정한 전압을 가지는 반면, 부하각에 따라 전류 크기 및 전류 위상각이 변하게 되고 토크 및 출력특성이 변하게 된다[4],[5].

그림 4는 매입형 영구자석 전동기의 일반적인 토크 특성을 나타낸 것으로 전류의 크기에 따른 토크 특성을 전류 위상각에 따라 나타내었다. 전류의 크기가 증가할수록 단위전류 당 최대토크가 발생하는 전류 위상각은  $45^\circ$  부근으로 이동하게 된다. 인버터 구동 전류 제어용 전동기의 경우에는 부하가 증가하는 경우 전류의 제어를 통하여 항상 단위전류 당 최대토크가 발생하도록 제어가 가능하지만 일정한 전압을 인가하는 단상 LSPMSM의 경우 부하의 변동에 따라 전류 크기 및 전류 위상각은 변하게 되고 각 부하에 따라서 운전하는 전류 위상각은 항상 단위전류당 최대토크가 발생하는 지점에 존재하는 것은 아니다. 따라서, 정전압 구동 전동기의 설계에서는 부하에 따라 전동기 운전 영역이 단위전류 당 최대토크 지점이 되도록 전동기의 회로정수를 산정하는 것이 매우 중요하다.

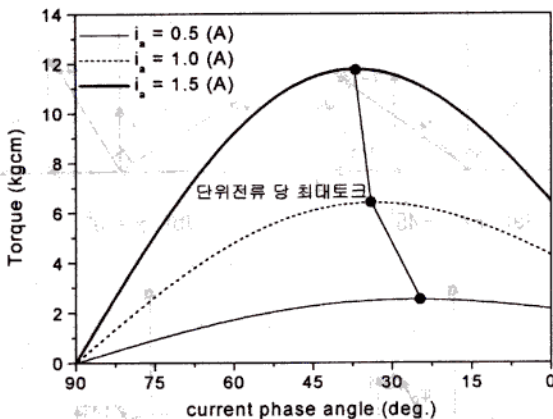


그림 4 전류의 크기에 따른 IPMSM의 토크 특성  
Fig. 4 Torque characteristics of IPMSM by current

그림 5는 전압과  $q$ 축이 이루는 각도인 부하각에 따른 전동기의 특성을  $d$ - $q$ 축 벡터도로부터 분석하였다. 이때,  $L_q$ 와  $L_d$ 의 비( $L_q/L_d$ )인 돌극비가 3이라고 가정하였다. 제어기를 사용하지 않고 상용전원과 같이 일정전압으로 구동되는

정전압 구동 전동기에서 전압의 크기는 일정하고 부하각의 크기만 변하므로, 전기와 반작용을 고려한 유기전압의 크기는 항상 일정한 반면 부하각이 증가할수록 전류의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 정전압원 전동기에서는 부하에 따라 부하각과 전류가 가변하고 있다. 또한, 부하각이 증가함에 따라 전류 위상각이 지상에서 전상으로 이동하고 있다. 매입형 영구자석 전동기의 경우 릴렉턴스 토크에 의해 단위전류 당 최대 토크 운전영역이 전류 위상각이  $45^\circ$  부근에 존재하므로 정전압 구동 전동기의 경우에도 회로정수와 부하각의 관계를 고려해서 정격부하에서 단위전류 당 최대 토크로 운전하는 전류 위상각을 가지도록 무부하 역기 전력과  $d$ - $q$ 축 회로 정수를 결정해야 하며, 회로 정수 변화에 따른 특성변화의 정밀한 분석이 이루어져야 한다.

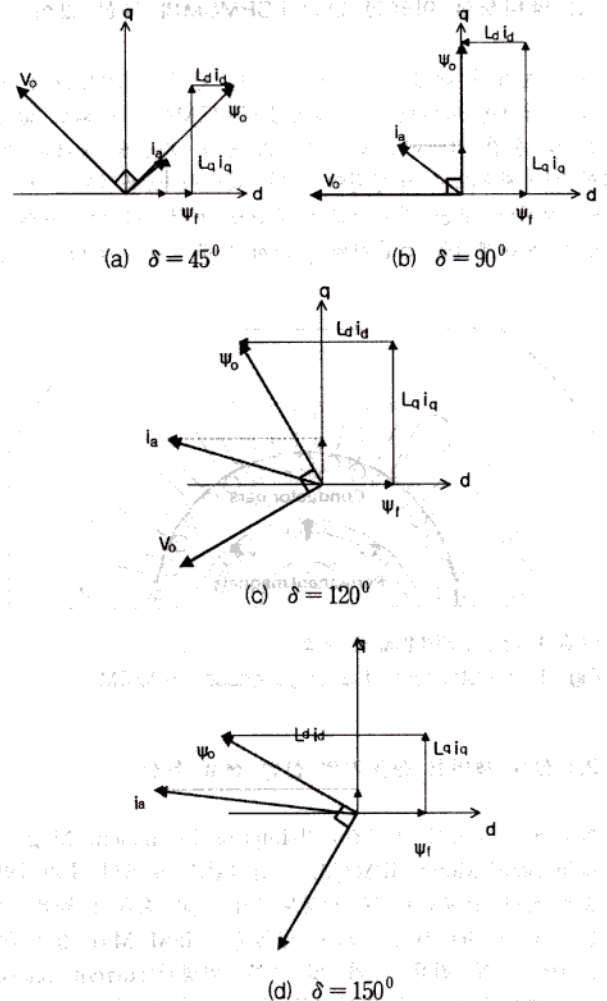


그림 5 부하각에 따른 정전압 구동 LSPMSM의 특성  
Fig. 5 Characteristics of LSPMSM motor driven constant voltage by load angle

## 3. 단상 LSPMSM의 특성해석

단상 LSPMSM의 회전자 구조와 고정자 회로를 그림 7의 (a)에 나타내었다. 해석 대상의 단상 LSPMSM은 주권선과 보조권선이 공간적으로  $90^\circ$  위상차를 가지고 있고 동일한

단상 입력을 이용하며, 보조권선에는 기자력의 시간적 위상차를 만들기 위해 캐패시터가 직렬 연결되어 있다.

그림 6의 (a)와 같이 해석 대상 전동기는 주권선과 보조권선으로 구성된 비대칭 2상 전동기이다. 주권선과 보조권선의 권선수가 다르기 때문에 식 (3)과 같은 주권선과 보조권선간의 권선비를 고려하여 주권선과 보조권선이 동일한 이상적인 2상 전동기로 변환해야 한다.

$$a = \frac{k_{wA} N_A}{k_{wM} N_M} \quad (3)$$

여기서,  $k_{wM}$ ,  $k_{wA}$ 는 각각 주권선과 보조권선의 권선계수이다. 식 (3)의 권선비를 이용하여 주권선을 기준으로 보조권선을 치환하면 다음과 같다.

$$R_A' = \frac{R_A}{a^2}, X_{AI}' = \frac{X_{AI}}{a^2}, Z_p'' = \frac{Z_p}{a^2} \quad (4)$$

$$V_A' = \frac{V_A}{a}, I_A' = a I_A \quad (5)$$

여기서,  $M$ 은 주권선,  $A$ 는 보조권선,  $I$ 은 누설을 나타내며, 외부 임피던스에는 운전 캐패시턴스가 포함되어 있다.

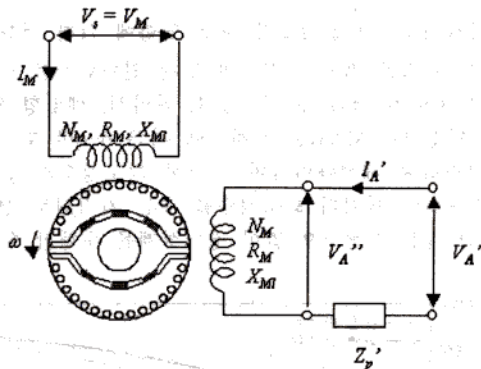
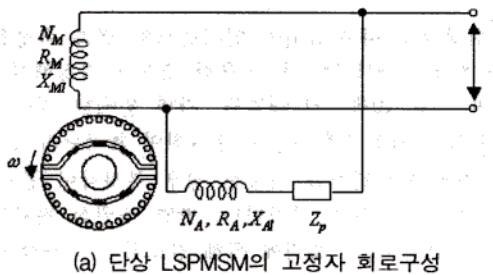


그림 6 단상 LSPMSM의 회로  
Fig. 6 Circuit of single-phase LSPMSM

권선비를 이용하여 치환하여도 주권선과 보조권선간의 권선방식 및 선경이 다르면 임피던스의 차이가 발생하므로 이를 보정하기 위해 식 (6)과 같은 외부 임피던스가 보조권선에 직렬로 연결되어 있다고 가정하였다.[4]~[6]

$$Z_p' = Z_p'' + (R_A' - R_M) + j(X_{AI}' - X_{MI}) \quad (6)$$

식 (3)~(6)의 과정을 통해 이상적인 2상 전동기로 변환된

고정자 회로는 그림 7의 (b)와 같다. 이 때 다음과 같은 회로방정식이 성립한다.

$$V_A' = V_A'' + Z_p' I_A' \quad (5)$$

단상 LSPMSM은 대칭좌표 변환으로부터 정상분과 역상분으로 분리하여 해석하였으며, 정상분 전압으로부터 전류 및 특성해석을 수행하였다. 대칭좌표계법으로 정상분과 역상분의 전압을 분리하려면, 정상분과 역상분의 임피던스를 산정해야한다. 그러나, 정상분 임피던스는 정상상태 해석을 위한 d-q축과는 다른 기준축이므로 d-q축 임피던스를 직접 정상분 임피던스로 사용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 특정 부하각에서 정상분 전압을 동기좌표계상의 전압으로 가정한 후 동기전동기의 전압방정식으로부터 d-q축 전류와 정상분 임피던스를 산정하고 초기전압과 비교한 후 정상분 전압이 수렴할 때까지 반복 수행하였다[4],[6]. 이때 동기 좌표계상의 d-q축 인덕턴스는 유한요소해석으로 산정하였고 부하각에 따른 정상상태 해석과정을 그림 7에 나타내었다. 반면, 역상분의 자계는 회전자의 회전방향과 반대 방향으로 전동기의 자기적 상태가 순시적으로 달라지기 때문에 정밀한 벡터해석이 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 역상분의 임피던스는 d-q축 임피던스의 평균값으로 고려하였다[6].

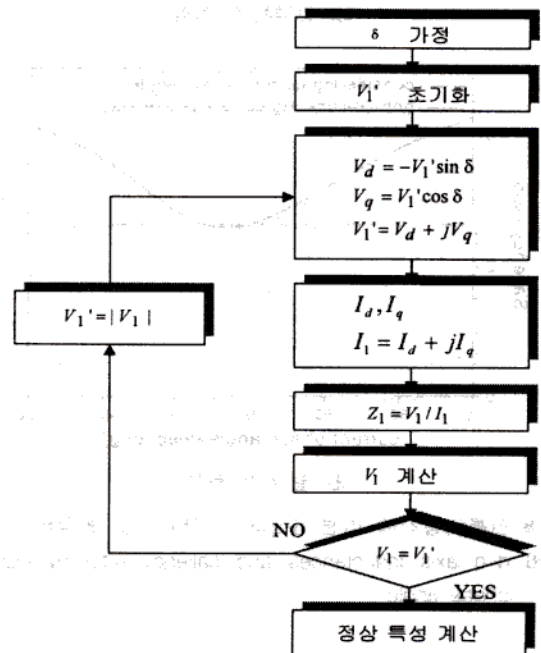
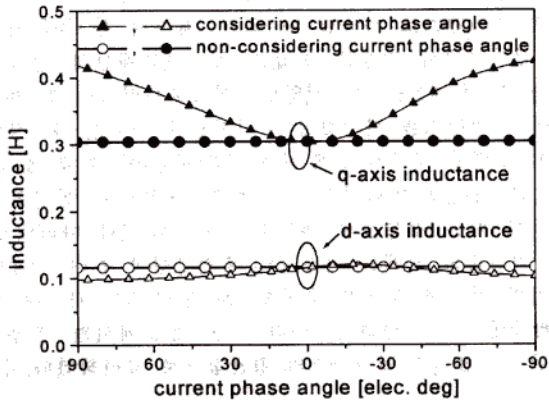


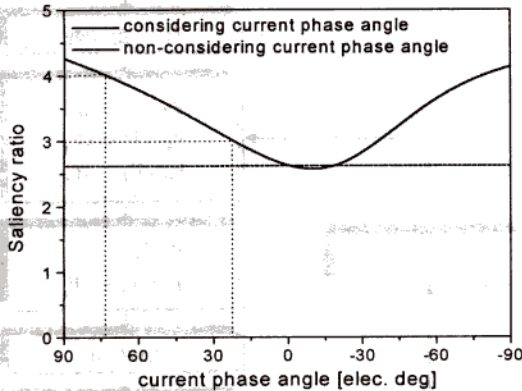
그림 7 정상상태 해석과정  
Fig. 7 Steady state analysis process

단상 LSPMSM의 d-q축 인덕턴스는 부하 전류의 크기 및 전류 위상각에 따라 철심 각 영역의 포화정도가 달라 회전자와 고정자 극의 상대 위치에 따른 인덕턴스 변화가 발생한다. 따라서 매입형 영구자석 구조의 단상 LSPMSM 특성해석을 위해 유한요소법을 적용하여 전류위상각에 따라 회전자 포화를 고려한 d-q축 인덕턴스를 산정하여 특성해석에 적용하였다. 유한요소법으로 산정한 d-q축 인덕턴스 및 돌극비(saliency ratio) 특

성을 전류 위상각 변화에 따른 포화 현상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하여 그림 8에 나타내었다. d축 인덕턴스는 매입된 영구자석의 공간으로 인하여 전류위상각에 따른 변화는 심하지 않지만 q축 인덕턴스는 전류위상각에 따라서 큰 변화가 발생하여 전류위상각이 0° 부근에서의 돌극비는 약 2.5정도가 되나 90°의 전류위상각에서는 돌극비가 4이상 이 된다. 따라서, 정전압 구동용 단상 유도형 동기 전동기의 경우 부하전류와 d-q축 회로정수의 관계로부터 운전되는 전류위상각에 따라 전동기의 특성은 크게 달라진다.



(a) 인덕턴스 특성



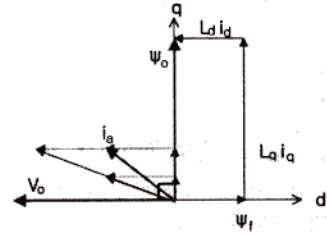
(b) 돌극비 특성

그림 8 전류위상각에 따른 d-q축 인덕턴스 및 돌극비  
Fig. 8 d-q axis inductances and saliency ratio by current phase angle

그림 9의 벡터도는 일정한 부하각에서 돌극비 변화에 따른 정전압 구동 단상 LSPMSM의 전압-전류 특성을 나타내었다. 이때, 저항에 의한 전압강하는 무시하였다.

d-q축 인덕턴스 변화에 의해 돌극비가 증가하면 동일한 부하각에서도 전류위상각은 증가하고 역률도 증가한다. 전류의 크기는  $L_d$ 가 감소하여 돌극비가 증가하는 경우 전류는 증가하는 반면  $L_q$ 가 증가하여 돌극비가 커지는 경우에는 전류가 감소한다. 따라서 돌극비가 증가하면 낮은 부하각에서 단위전류 당 최대 토크로 운전하며 효율은 증가한다.  $L_d$ 가 감소하여 돌극비를 증가하는 경우 전류 증가에

의해 최대 토크는 증가하지만  $L_q$ 가 증가하는 경우 전류 감소에 의해 최대 토크는 감소한다. 따라서 전류 위상각에 따른 d-q축 인덕턴스의 변화 특성을 고려하여 특성 해석을 수행한 경우와 전류 위상각 특성을 고려하지 않은 경우의 해석결과는 큰 차이가 발생한다.



(a) 벡터도

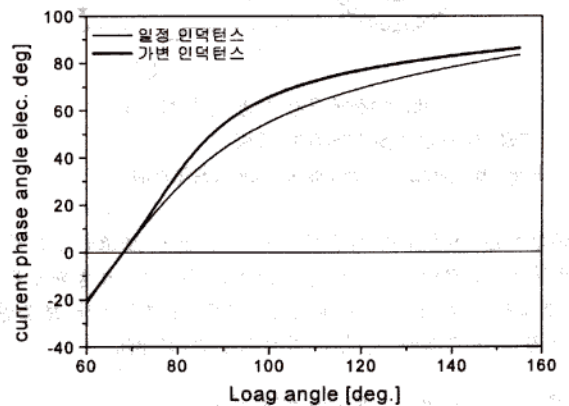


(b) 초기상태 (c)  $L_d$ 가 초기치의 1/2배 (d)  $L_q$ 가 초기치의 2배

그림 9 돌극비 변화에 따른 전류 특성

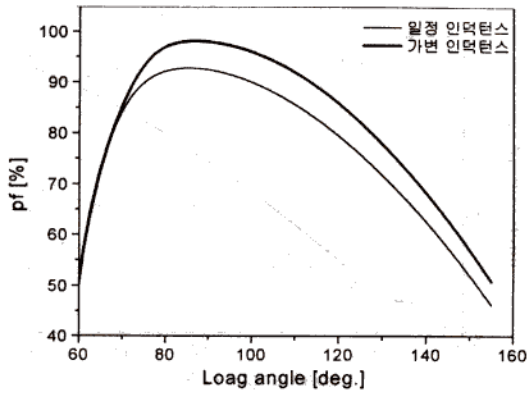
Fig. 9 Current characteristics by changing saliency ratio

전류위상각에 따른 d-q축 인덕턴스의 변화 특성을 고려한 경우와 일정 인덕턴스를 적용한 경우의 특성해석 결과를 비교하여 그림 10에 나타내었다. 가변 인덕턴스의 경우 전류위상각이 증가할수록  $L_q$ 가 증가하여 돌극비가 증가한다. 따라서 가변 인덕턴스를 적용한 경우 부하각이 증가할수록 전류위상각 및 역률은 증가한다. 반면 주권선 전류는 부하각 90°까지는  $L_q$ 의 증가에 의해 감소하나 부하각 90° 이상에서는  $L_d$ 의 감소에 의해 전류는 증가한다. 즉, 최대출력은 부하각 120°에서  $L_d$ 의 감소 영향에 의한 전류 증가로 가변 인덕턴스를 적용한 경우와 일정 인덕턴스를 적용한 결과는 큰 차이가 남을 알 수 있다. 따라서, 매입형 영구자석 구조의 단상 LSPMSM은 부하각에 따른 d-q축 회로정수 특성을 고려하여 해석해야하며 이러한 회로정수의 변화를 설계에 적용하여 최적의 회로정수를 갖는 자기회로 설계를 병행한다면 많은 시행착오 없이 정밀설계를 수행할 수 있다.

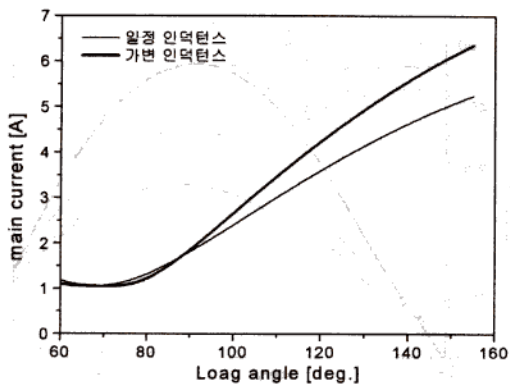


(a) 전류위상각

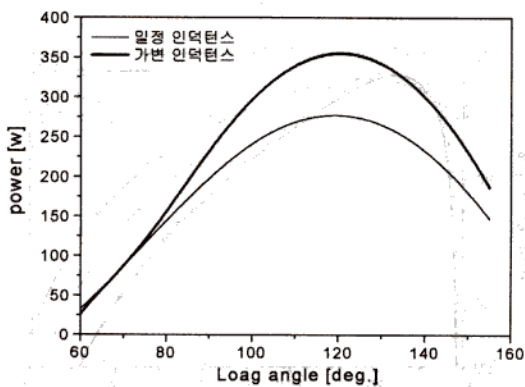




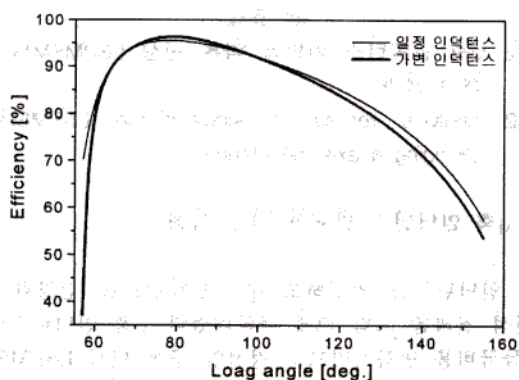
(b) 역률



(c) 주권선 전류



(d) 출력



(e) 효율

그림 10 부하각에 따른 단상 LSPMSM의 특성

Fig. 10 Characteristics of LSPMSM by load angle

#### 4. 회로정수 변화에 따른 특성해석

해석대상인 단상 LSPMSM의 정상상태 특성해석을 위한 입력 조건은 표 1과 같다. 무부하 역기전력의 실효치는 유한요소 해석의 결과를 적용하였고, 입력 전압 및 전류, 역기전력은 모두 정현파라고 가정하였다. d-q축 인덕턴스는 주권선 전류가 1.3(A), 보조권선 전류가 0.75(A) 인가된 상태에서 전류위상각  $0^\circ$ 의 값을 초기값으로 적용하여 해석을 반복 수행하였다.

표 1 해석 조건

Table 1 Analysis condition

항 목	단 위	수 치
전 압	(V)	115
d축 인덕턴스 초기값	(mH)	107
BEMF	(Vrms)	58
극수	(Hz)	2
주파수	(mH)	60
q축 인덕턴스 초기값	( $\mu$ F)	370
운전 캐패시턴스 Cr	(rpm)	12
동기속도		3600

#### 4.1 d축 인덕턴스 변화에 따른 특성

해석대상의 전동기에 대하여 q축 인덕턴스는 일정하고 d축 인덕턴스만을 변경한 경우 단상 LSPMSM의 특성을 해석하였으며, d축 인덕턴스의 변화를 그림 11에 나타내었다. 이때, d-q축 인덕턴스는 전류위상각에 대하여 일정하게 증가, 또는 감소시켰다.

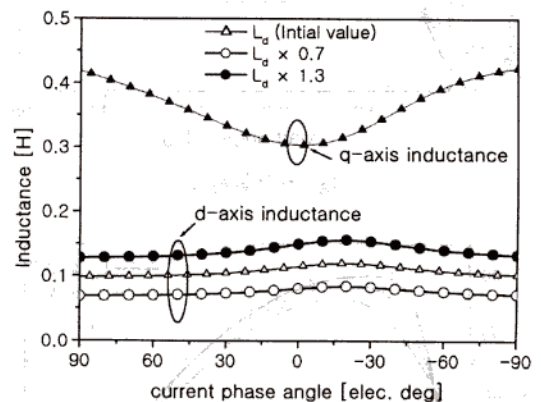


그림 11 d-q축 인덕턴스 특성

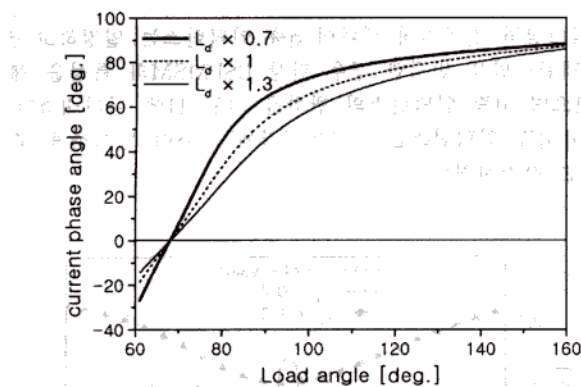
Fig. 11 Inductances characteristics on d-q axis

d축 인덕턴스 변화에 따른 단상 LSPMSM의 특성해석 결과를 그림 12에 나타내었다. 그림 12(a)에서 부하각이  $70^\circ$  이상에서는 전류위상각이  $0^\circ$ 보다 큰 진상각을 가지며 이때 d축 인덕턴스가 30[%] 감소한 경우 돌극비는 약 43[%] 정도 증가하고 전류위상각의 변화가 급격하며 동일한 부하각

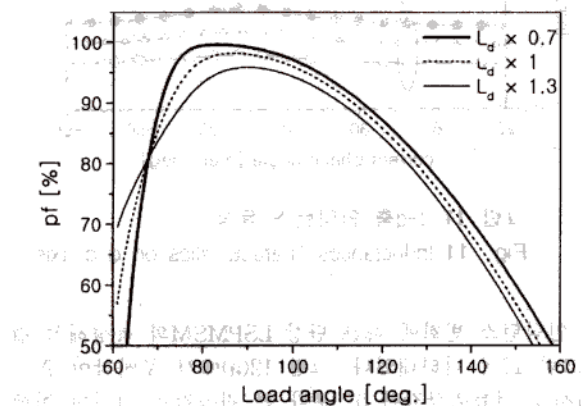


에서 큰 전류위상각을 가져 역률은 증가한다. 반면 d축 인덕턴스가 30[%] 증가한 경우에는 돌극비가 23[%]로 감소하였으며 동일 부하각에서 전류위상각의 감소로 역률이 저하함을 그림 12(b)에 나타내었다. d축 인덕턴스 변화에 따른 전류 특성은 보조권선의 전류는 구동 커패시터에 지배적인 영향을 받고, 인덕턴스의 변화에는 거의 영향을 받지 않는다. 따라서, 인덕턴스의 특성에 큰 영향을 받는 주권선 전류의 부하각에 따른 변화를 그림 12(c)에 나타내었다. 부하각이 증가할수록 전류위상각이 증가하며 전기자 반작용을 고려한 유기전압의 크기를 일정하게 유지하기 위해서 d축 전류는 증가한다. 이때 d축 인덕턴스를 감소한 경우 전류위상각이 더욱 증가하므로 전류 및 출력은 증가함을 그림 12(c), (d)로부터 알 수 있다. 또한 d축 인덕턴스의 감소는 돌극비를 향상시켜 밀력토크를 증가시킨다. 따라서 부하각이 낮은 영역에서는 돌극비의 증가에 의한 밀력토크의 증가로 d축 인덕턴스가 감소한 경우가 효율이 높은 반면 d축 인덕턴스가 증가하면 부하각에 따른 전류위상각의 변화가 낮아 d축 인덕턴스의 증가는 부하각에 따른 효율 변동이 적어 운전 부하의 변동이 극심한 시스템에 적합하다. 부하각에 따른 효율 특성은 그림 12(e)에 나타내었다.

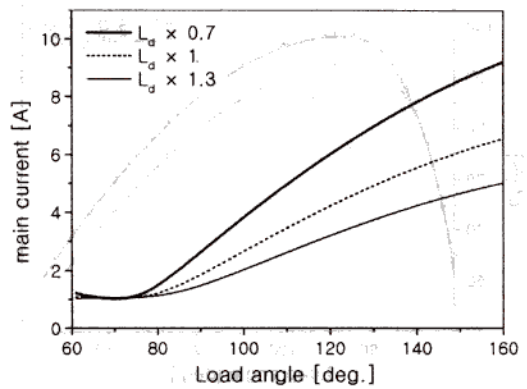
따라서, d축 인덕턴스가 감소할 경우, 전류는 증가하고, 최대출력 및 돌극비의 증가로 특정 부하각에서의 효율은 증가하지만 출력 전 영역에서의 효율 변화는 극심하게 나타난다.



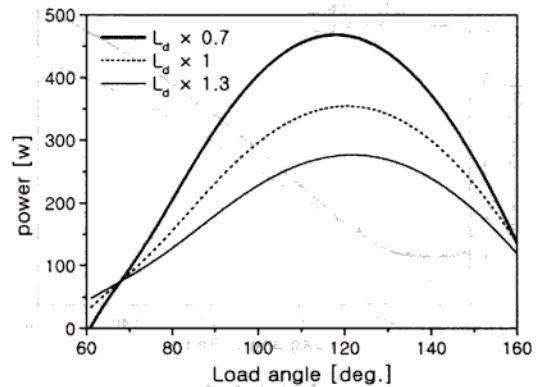
(a) 전류위상각



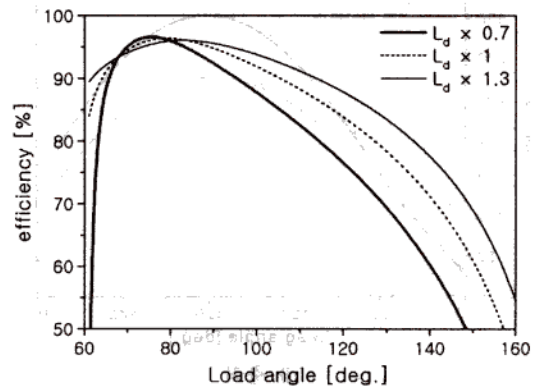
(b) 역률



(c) 주권선 전류



(d) 출력



(e) 효율

그림 12 d축 인덕턴스 가변에 따른 단상 LSPMSM의 특성 해석 결과

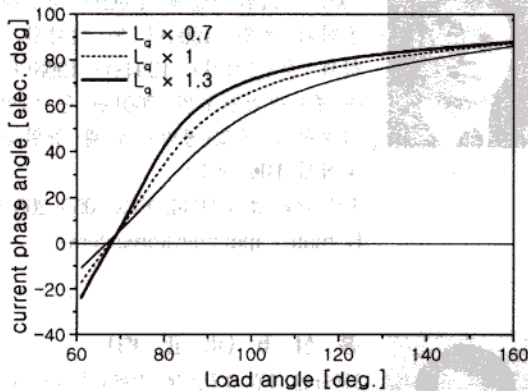
Fig. 12 Analysis results of single-phase LSPMSM by changing d-axis inductance

#### 4.2 q축 인덕턴스 변화에 따른 특성

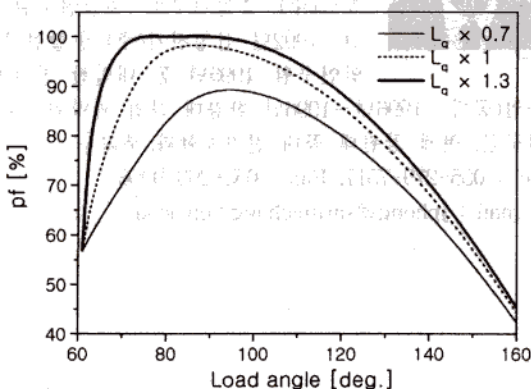
d축 인덕턴스는 일정하고 q축 인덕턴스를 변경한 경우 특성해석 결과를 그림 13에 나타내었다. q축 인덕턴스의 변화는 돌극비를 변화시키므로 정전압 구동 단상 LSPMSM의 전류, 전류위상각 및 출력등의 특성을 변화시킨다. q축 인덕턴스의 변화에 따른 전류 위상각 및 역률 특성은 d축 인덕턴스 변화와 마찬가지로 돌극비가 커지는 경우, 즉 q축 인

덕턴스가 증가면 그림 13(a) 및 (b)에서와 같이 전류위상각은 더욱 진상하게 되고 따라서 역률은 증가한다. 반면 부하각 60°에서 90°까지의 전류위상각은 -20°에서 60°까지 변화하며, q축 인덕턴스가 증가할수록 주권선 전류는 감소한다. q축 인덕턴스 변화시 부하각에 따른 주권선 전류 특성을 그림 13(c)에 나타내었으며, q축 인덕턴스의 증가로 인한 돌극비의 증가는 전기자 반작용을 고려한 유기전압을 일정하게 유지하기 위해 q축 전류가 감소하므로 전자기적 토크는 감소하지만 돌극비의 증가에 의한 릴럭턴스 토크는 증가하게 된다. 따라서 합성토크는 전자기적 토크의 감소와 릴럭턴스 토크의 증가를 함께 고려해야한다. 본 논문에서의 해석 모델은, q축 인덕턴스가 30[%] 증가하는 경우 부하각이 90° 이하인 영역에서 q축 전류의 감소에 의한 전자기적 토크의 감소분이 돌극비 증가에 의한 릴럭턴스 토크의 증가분 보다 커 합성토크는 감소하며, 부하각 90° 이상에서는 릴럭턴스 토크의 증가분이 보다 커 합성 토크는 증가함을 그림 14(d)에 나타내었다. 효율 특성은 그림 13(e)에 나타내었다. q축 인덕턴스의 증가로 전류는 감소한 반면 릴럭턴스 토크의 증가에 의해 효율은 q축 인덕턴스가 증가할수록 상승하게 된다.

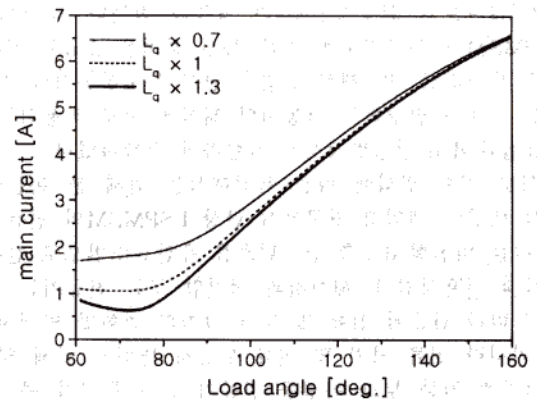
따라서 단상 LSPMSM의 설계시, 최대 토크 향상은 d축 인덕턴스를 줄이는 방향으로, 효율 향상은 q축 인덕턴스를 증가시키는 방향으로 회전자 및 고정자의 자기회로 설계가 이루어져야함을 알 수 있다.



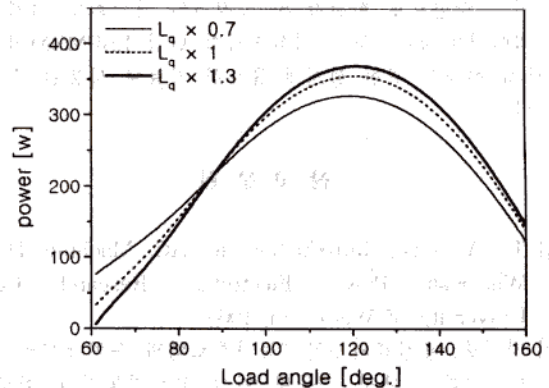
(a) 전류위상각



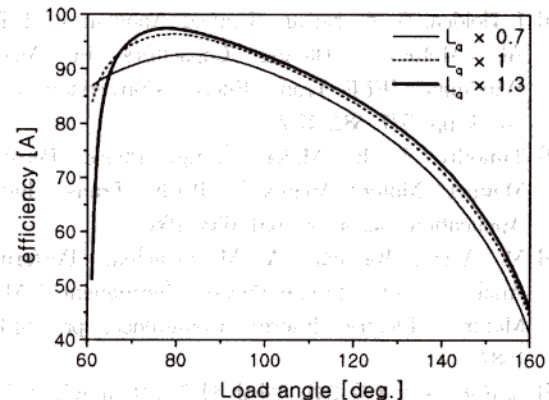
(b) 역률



(c) 주권선 전류



(d) 출력



(e) 효율

그림 13 q축 인덕턴스 가변에 따른 단상 LSPMSM의 특성 해석 결과

Fig.13 Analysis results of single phase LSPMSM by changing q-axis inductance

## 5. 결 론

정전압 구동 단상 LSPMSM은 전압은 일정하며 부하각에 따라 전류 위상각이 결정되며 이로 인해 역률 및 전류, 토크 등의 특성이 결정된다. 따라서 정전압 구동 전동기의 특성은 제어용 전동기와 같이 전류 및 전류 위상각 제어등을 행

하지 않으므로 회로정수에 큰 영향을 받는다. 따라서 단상 LSPMSM의 회로정수에 따른 특성 분석을 d-q축 벡터도를 통해 분석하였으며 해석 방법은 단상 유도전동기와 같이 불평형 자계가 발생하는 전동기의 해석에 주로 적용하는 대칭좌표법과 d-q 전압방정식을 결합하여 수행하였다.

회로 정수 변화에 따른 특성해석을 위해 본 논문에서의 해석 대상인 매입형 영구자석 단상 LSPMSM의 전류위상각에 따른 비선형 d-q축 인덕턴스를 유한요소법으로 산정하여 해석에 적용하였다. 해석결과 정전압 구동 전동기는 회로정수에 따라 단순히 전류 및 토크 크기의 변화만 발생하는 것이 아니라 전류 크기 및 전류 위상각 변화로 인해 역률 및 부하각에 따른 토크 특성등 전동기 전체 특성이 큰 영향을 받는다. 단상 LSPMSM의 설계시, 최대 토크 향상은 d축 인덕턴스를 줄이는 방향으로, 효율 향상은 q축 인덕턴스를 증가시키는 방향으로 회전자 및 고정자의 자기회로 설계가 이루어져야하며 본 논문의 해석결과가 단상 LSPMSM의 전동기 특성 향상을 위한 설계에 유용한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. A. Lipo, Introduction to AC Machine Design, Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin, 1966.
- [2] 강규홍, 홍정표의 3인, "등가회로법과 수치해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 회로정수 산정 및 특성해석", 대한전기학회 논문지 vol. 49, no. 11, pp.720-728, 2000. 11
- [3] I. Boldea, S. A. Nasar, "Unified Analysis of 1-Phase AC Motors Having Capacitors in Auxiliary Windings", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 577-582, 1999.
- [4] Timothy J. E. Miller, "Single-Phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Trans. Industry Application, no. 4, pp. 651-658, 1985.
- [5] M. Azizur Rahman, A. M. Osheiba, "Performance Analysis of Single-Phase Permanent Magnet Motors", Electric Energy Conference, pp. 514-519, 1987
- [6] 강규홍, 홍정표의 2인, "단상 영구자석 유도전동기의 특성해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 144-146, 2001. 4
- [7] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY, IEEE Power Engineering Society, 1995.

- [8] M. Azizur Rahman, Ping. Zhou, "Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996.
- [9] S. Mrimoto, M. Sanada, Y. Takeda, "Wide Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High Performance Current Regulator", IEEE Trans. Industry Applications, IA-30, no. 4, pp. 920-926, 1994.
- [10] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, J.W. Park "Improved parameters modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Finite Element Analysis", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, July 2000.

## 저 자 소 개



### 강 규 홍 (姜圭洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 창원대 전기공학과 BK 교수

Tel : 055-279-8044, Fax : 055-263-9956

E-mail : ipmsm@korea.com



### 홍 정 표 (洪正杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원. 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수

Tel : 055-279-7517, Fax : 055-263-9956

E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr