

영구자석 매입형 BLDC 모터 제어기의 모델링 및 시뮬레이션

이 동명°, 안 준호, 염 관호, 조 관열, 김 학원
LG 전자 리빙시스템 연구소

Modeling and Simulation of Interior Permanent - Magnet BLDC Motor Drive

Dong-Myung Lee°, Jun-Ho Ann, Kwan-Ho Yeum, Kwan-Youl Cho, Hag-Wone Kim
Living System Research Lab. LG Electronics Inc.

ABSTRACT

Recently, the BLDC(Brushless DC) motor has been increasingly applied to home appliance and the study of BLDC motor drive is extensively processing, so it is necessary to investigate the characteristic of the BLDC motor drive.

In this paper, we proposed the modeling of interior permanent - magnet BLDC motor drive. The state model of motor and the model of inverter using pulse width modulation are included. The modeling is verified by the experimental results

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발전에 따라, 가변속제어기의 적용이 점차 확대되고 있다. 이러한 추세에 따라 최근 가진 분야에서도 종래의 정속운전 Mode 에서 인버터 기술을 이용한 가변속시스템의 적용 및 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 가변속 시스템에 사용되는 모터로는 유도전동기 등의 다른 모타에 비해 효율이 좋고, 저속시 고 토크를 내는 등 토크 및 소음특성등이 우수한 BLDC (Brushless DC) 모터이며, 이러한 특징을 가진 BLDC 모터를 이용한 가변속 제어 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 이러한 BLDC 모터 제어기에 대한 모델링 및 시뮬레이션을 행하였다. 본 논문의 모터는 SPM motor (영구자석 표면부착형 BLDC 모터)와 달리 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 달라지는 즉, 들극성을 가진 IPM motor (영구자석 매입형 BLDC 모터)에 대한 것이며, 모델링의 검증 을 위하여 실험을 행하였다.

2. 본 론

2.1 모터의 상태방정식

그림 1은 영구자석 매입형 BLDC 모터를 나타낸다. 매입된 영구자석에 의해 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 달라지는 들극성을 가지게 된다.

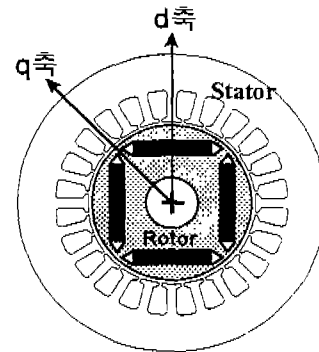


그림 1. 영구자석 매입형 BLDC 모터

매입형 BLDC 모터의 경우에는 SPM motor (Surface mounted Permanent- Magnet motor)와 달리 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 달라지므로, 이로 인한 리플턴스 토크가 발생되며 Open Phase 의 상전압이 달라지게 된다.

IPM 모터의 상태방정식은 식(1)과 같다[1].

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad \text{식 (1)}$$

한편, 행렬의 구성은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 a. L_a &= L_{ls} + L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos 2\theta \\
 b. L_b &= L_{ls} + L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos(2\theta + 2\pi/3) \\
 c. L_c &= L_{ls} + L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos(2\theta - 2\pi/3) \\
 d. L_{ab} &= L_{ba} = -0.5L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos(2\theta - 2\pi/3) \\
 e. L_{bc} &= L_{cb} = -0.5L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos 2\theta \\
 f. L_{ca} &= L_{ac} = -0.5L_{g0} - L_{g2} \cdot \cos(2\theta + 2\pi/3)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2}(L_{g0} - L_{g2}), \quad L_q = L_{ls} + \frac{3}{2}(L_{g0} + L_{g2})$$

한편, 모터의 발생 토크는 마크네틱 토크 (T_m)와 리럭턴스 토크 (T_r) 두 성분을 가진다.

$$\begin{aligned}
 T_m &= (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) / \omega_m \\
 T_r &= \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (L_d - L_q) \cdot i_{ds}^* \cdot i_{qs}^* \\
 T_e &= T_m + T_r
 \end{aligned} \tag{2}$$

2.2 인버터 모델링

2상 통전방식의 Freewheeling 구간 및 Mode 에 따른 인버터 모델링은 인가 전압의 형태로 정의한 후 중성점 전압과의 관계를 이용하여 상전압 형태로 변환하였다. 2상 통전에서의 Mode 에 따른 인가 전압은 그림 2와 같다.

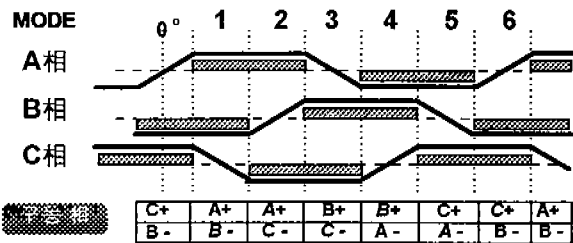


그림 2. Mode 에 따른 전류흐름

2.3 전압방정식

단자 전압은 DC Link 의 가상 중성점을 기준으로 하여 각 상에 대한 인가 전압의 형태로 나타냈으며, 우선 Mode 6 에서 1로 변환되는 경우를 예로 인버터의 단자전압에 대하여 설명한다.

Mode 6 에서 1로 변환시, 그림 3 과 4 에서의 B

상의 하측 스위치가 PWM 하게 된다. 이때 C 상의 전류는 Freewheeling 하게 되고, B 상 전류는 PWM on 시에는 스위치를 통해 통전하고, PWM off 시에는 Diode 를 통해 Freewheeling 하게 되며, 각 상의 인가전압은 식(3)과 식(4)로 표시된다.

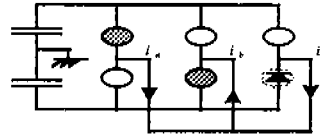


그림 3. PWM on 시 (Mode 6 → 1)

$$V_a = \frac{1}{2} \cdot V_{DC}, \quad V_b = -\frac{1}{2} \cdot V_{DC}, \quad V_c = -\frac{1}{2} \cdot V_{DC} \tag{3}$$

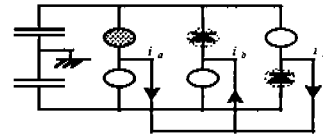


그림 4. PWM off 시 (Mode 6 → 1)

$$V_a = \frac{1}{2} \cdot V_{DC}, \quad V_b = \frac{1}{2} \cdot V_{DC}, \quad V_c = -\frac{1}{2} \cdot V_{DC} \tag{4}$$

한편 Mode 1 의 시작은 C 상에 흐르던 전류의 Freewheeling 이 끝난 시점이며, Mode 1 에서는 Mode 변환시와는 달리 모터의 3상 중에 1상의 Open Phase 가 존재하므로, 인가 전압의 형태에 모터의 유기전압을 Open Phase 에 추가하는 형태로 단자전압을 결정하여야 하며, 이 때 단자전압의 형태는 매입형 BLDC 모터의 경우에는 위치에 따라 모터의 인덕턴스가 달라져, 인덕턴스변화에 따른 유기전압 성분이 존재하게 된다. 우선 모델링의 간결성을 위해서 SPM 을 예로 Mode 1 의 단자전압을 나타내면 식(5), 식(6)과 같다[2].

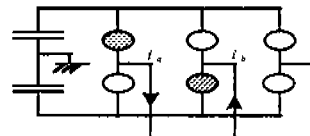


그림 5. PWM on 시 (Mode 1)

$$\begin{aligned}
 V_a &= \frac{1}{2} \cdot V_{DC}, \quad V_b = -\frac{1}{2} \cdot V_{DC} \\
 V_c &= E_c - (E_a + E_b) / 2
 \end{aligned} \tag{5}$$

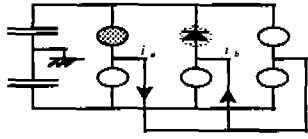


그림 6. PWM off 시 (Mode 1)

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{2} \cdot V_{oc}, \quad V_b = \frac{1}{2} \cdot V_{oc} \\ V_c &= E_c - (E_a + E_b) / 2 + V_{oc} / 2 \end{aligned} \quad \text{식 (6)}$$

식(5)에서의 Open Phase 단자전압(V_c)은 SPM의 경우 아래의 관계로부터 얻어진다.

우선, 중성점 전위(V_s)와 모터 유기전압의 관계식은 식(1)로부터 회전자의 위치에 따라 인덕턴스의 변화가 없는 경우 식(7)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} V_{os} &= V_a - V_s, \quad V_{bs} = V_b - V_s \\ V_{as} + V_{bs} &= V_a + V_b - 2V_s = E_a + E_b \\ V_s &= -(E_a + E_b) / 2 \end{aligned} \quad \text{식 (7)}$$

식(7)에서 얻어진 Open Phase 중성점 전위 V_s 로부터 단자전압 V_c 는 식(8)과 같이 얻어진다. 식(6)의 PWM off 시 Open Phase 단자전압인 V_c 도 동일한 방식으로 얻을 수 있다.

$$V_c = V_{cs} + V_s = E_c + V_s = E_c - (E_a + E_b) / 2 \quad \text{식 (8)}$$

여기서,

- V_a, V_b, V_c : 단자 전압
- V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : 상전압 (V_s 기준)
- V_s : 모터 중성점 전위
- E_a, E_b, E_c : 모터 유기 전압

한편, 영구자석 매입형 BLDC 모터 즉, IPM의 경우에는 중성점 전위와 Open Phase의 전압이 식(5), 식(6)과 같이 나타나지 않는다. 즉, IPM에서는 식(5), 식(6)과 같이 SPM에 적용한 (Mode 1) 식(9)의 관계가 성립되지 않는다.

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) - \frac{1}{3}(E_a + E_b + E_c) \\ V_{as} + V_{bs} &= V_a + V_b - 2V_s = E_a + E_b \end{aligned} \quad \text{식 (9)}$$

Mode 1에서 Open Phase 시 중성점 전위 및 단자전압은 IPM의 경우 회전자의 위치에 따른 변화분이 존재하므로 이 변화분을 단자전압에 반영시

킨 식(10)과 식(11)의 형태로 나타난다.

$$V_s = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) - \frac{1}{3}(E_a + E_b + E_c + V_n^\theta) \quad \text{식 (10)}$$

$$V_{as} + V_{bs} = V_a + V_b - 2V_s = E_a + E_b + V_s^\theta \quad \text{식 (11)}$$

식(10)에서의 위치에 따른 중성점 전위 변화분 (V_n)은 식(1)로부터 얻어지며, 식(1)에서 위치에 따른 인덕턴스 변화분을 고려하면 식(12)와 같이 나타난다.

$$V_n^\theta = l \cdot p i_a + m \cdot p i_b + n \cdot p i_c \quad \text{식 (12)}$$

여기서,

$$\begin{aligned} l &= (a + d + e) = L_{ls} - L_{\phi 0} \cdot [2 \cos 2\theta + \cos(2\theta + 2\pi/3)] \\ m &= (d + b + f) = L_{ls} - L_{\phi 0} \cdot [2 \cos(2\theta + 2\pi/3) + \cos(2\theta - 2\pi/3)] \\ n &= (e + f + c) = L_{ls} - L_{\phi 0} \cdot [\cos 2\theta + \cos(2\theta + 2\pi/3) + \cos(2\theta - 2\pi/3)] \end{aligned}$$

한편, 식(11)에서의 회전자의 위치에 따른 유기전압 변화분 (V_s)는 아래의 관계로부터 얻어진다. 식(5)의 C상 Open인 경우를 예로 보면, 식(1)로부터 모터 상전압의 합인 식(13)을 얻을 수 있다.

$$V_{as} + V_{bs} = R_s \cdot (i_a + i_b) + \rho(L_a i_a + L_{\phi 0} i_b + L_{\phi 0} i_a + L_b i_b) + (E_a + E_b) \quad \text{식 (13)}$$

식(13)의 미분항을 정리하면, 식(14)와 같다.

$$\rho[L_{ab}(i_a + i_b) + (L_a i_a + L_b i_b)] \quad \text{식 (14)}$$

식(14)에서 앞항은 전류의 합이 영이므로 소거되지만, 뒷항은 영이 되지 않는다. 따라서, 식(14)의 뒷항을 단자전압에 반영시켜야 한다.

또한, 식(8)에서 C상이 Open된 경우 $V_{cs} = E_c$ 로 가정하였으나, 이 항에도 회전자의 위치에 따른 변화분을 반영하여야 한다.

따라서, 식(8)의 Open Phase 단자전압은 IPM의 경우 식(15)와 같이 나타난다.

$$V_c = E_c + V_s^{\theta \phi \theta \theta} - (E_a + E_b + V_s^\theta) / 2 \quad \text{식 (15)}$$

식(15)는 Mode 1에서 C상이 Open된 경우의 회전자의 위치에 대한 변화분을 표시한 것이며, 각 Mode에 대한 Open Phase에 전압 변화분을 정리

하면 표 1 과 같다.

Open 상	V_s^θ	V_s^{open}
A 상	$p(L_b \cdot i_b + L_c \cdot i_c)$	$p(L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c)$
B 상	$p(L_c \cdot i_c + L_a \cdot i_a)$	$p(L_{bc} \cdot i_c + L_{ba} \cdot i_a)$
C 상	$p(L_a \cdot i_a + L_b \cdot i_b)$	$p(L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b)$

표 1. Open Phase 에 대한 전압분

3. 실험 및 시뮬레이션

본 논문의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 행하였다.

실험은 부하상태를 일정하게 하기 위하여 그림 2 와 같이 Dynamo 세트를 구성하였으며, 부하 모터를 통한 속도제어를 하였고, BLDC 모터의 제어는 인가전압의 Duty 를 가변하여, 부하모터와의 속도차에 의하여 부하를 인가시켰다.

서로 다른 3 가지 조건에서 실험 및 시뮬레이션을 행하였다. 그림 8 에서 그림 13 까지의 파형은 각각의 조건에서의 전류의 실험 및 시뮬레이션 파형이다. 그림 8 에서 그림 13 까지의 각 파형에서 볼 수 있듯이 전류 실험 파형과 비교해 봤을 때 시뮬레이션 전류 파형의 크기와 형상이 일치함을 볼 수 있다. 그림 14 는 상전류 실효치에 대한 토크의 실험치와 시뮬레이션치이다. 모터의 속도 4200[RPM] 일 때의 값을 비교한 것으로 점선은 시뮬레이션치, 실선은 실험치이다. 그림 14 에서 볼 수 있듯이 실험치와 시뮬레이션치가 일치함을 볼 수 있다.

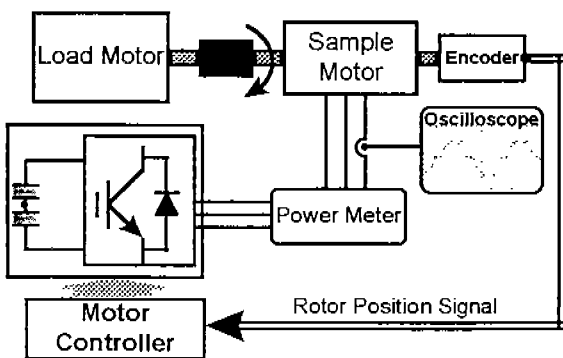


그림 7. 부하 장치도

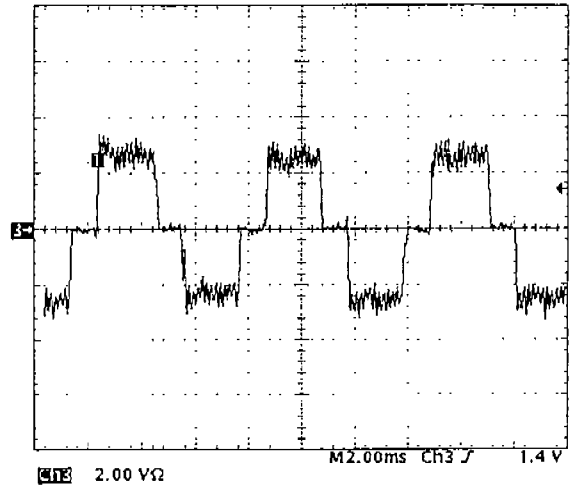


그림 8. 전류 실험 파형 (@4200[rpm], @5.4kg-cm 2A/Div.)

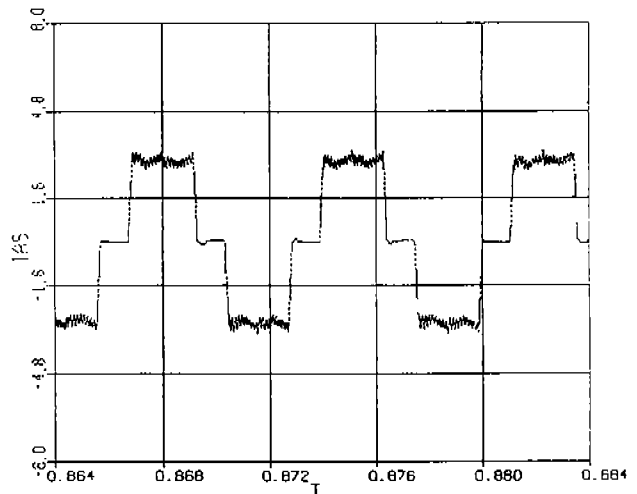


그림 9. 전류 시뮬레이션 파형 (@4200[rpm], 3.2A/Div.)

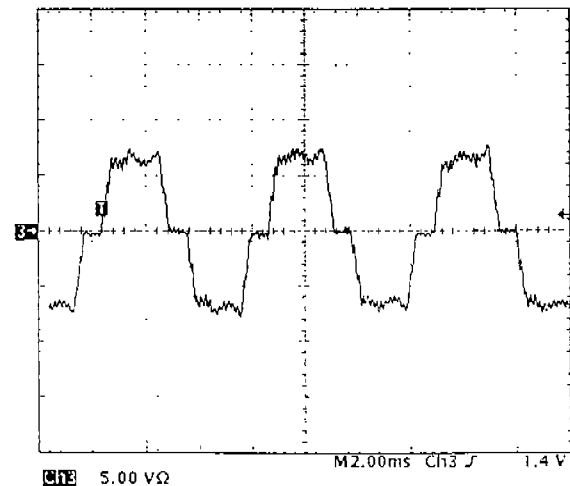


그림 10. 전류 실험 파형 (@4800[rpm], @15kg-cm, 5A/Div.)

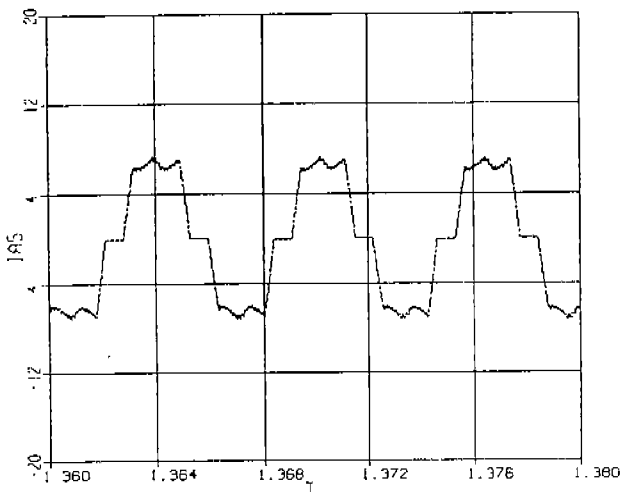


그림 11. 전류 시뮬레이션 파형
(@4800[rpm], 8A/Div.)

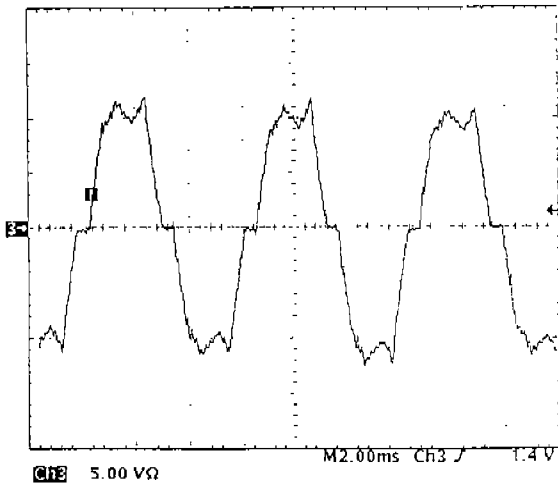


그림 12. 전류 실험 파형
(@4800[rpm], @24.7kg-cm, 5A/Div.)

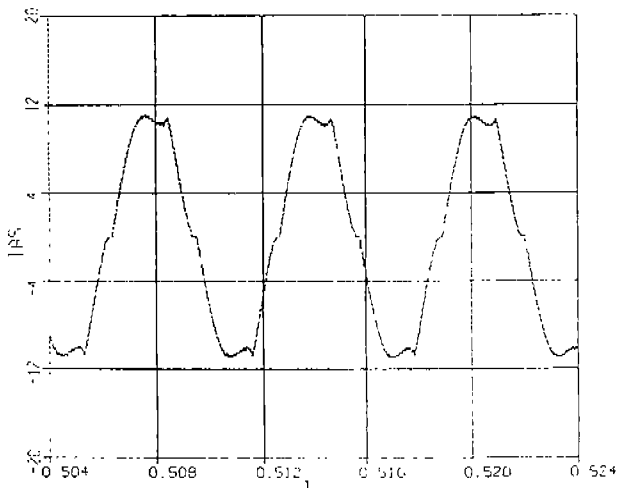


그림 13. 전류 시뮬레이션 파형
(@4800[rpm], 8A/Div.)

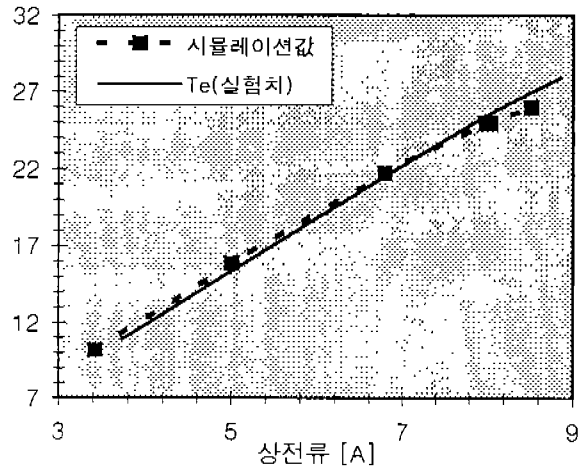


그림 14. 전류에 대한 토크값

4. 결 론

최근 가변속 제어기의 적용에 대한 연구가 가전분야에서 점차 확대되고 있다. 이러한 추세에 따라 본 논문에서는 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 변화하는 영구자석 매입형 BLDC 모터 제어기에 대한 모델링을 행하였으며, 모델링의 검증을 위하여 실험을 통하여 모델링의 타당성을 검증하였다.

이 BLDC 가변 제어시스템에 대한 모델링은 향후 알고리즘 개발 등에 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 竹下 陸晴, “돌극형 브러시리스모터의 센서리스운전,” 모-타기술シンポジウム, 일본능률협회, p A-2-2-1~A-2-2-12, 1996.
- [2] Claus B. Rasmussen, M.Sc.E.E., “Modelling and Simulation of Surface Mounted PM Motors”, Ph.D.Thesis, Aalborg univ., 1994.