철도차량용 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계 및 속도제어에 관한 연구

A Study on the Design and Speed Control of the Switched Reluctance Motor for Railway Traction Application

조 희¹ · 김경화^{2†}

Hee Jo · Kyeong-Hwa Kim

Abstract In this paper, a magnetic analysis of SRM(Switched Reluctance Motor) using 3d finite element method considering end-coil effect is presented. SRM models with different stator pole shapes are taken into consideration for the analysis of magnetic characteristics. It is observed that a stator pole shape model having a pole shoe depth is the most suitable one for railway traction application because it gives an improved inductance and torque characteristic. For a speed control of SRM, the PI and sliding mode controllers are applied to designed SRM with magnetic characteristic data obtained from the magnetic analysis. The simulations are carried out using Matlab-Simulink and the control performance is analyzed. By employing the sliding mode controller, the transient response as well as the steady-state error are much improved under a load variation of railway resistance under operation.

Keywords : SRM, 3d Finite element method, Sliding mode control, PI control, Railway resistance

초 록 3차원 유한요소법을 이용하여 엔드코일 효과를 고려한 SRM의 자계해석을 수행하였다. 고정자 극 형상에 따른 자계특성의 비교를 통하여 제안된 형상에서 자계특성이 향상됨을 확인하였다. 해석한 자계특성을 적용하여 철도부하에 대한 PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기의 속도제어를 수행하였다. 속도 제어 시뮬레이션은 Matlab-Simulink를 사용하여 구현되었으며 부하 가변 조건에서 슬라이딩모드 제어기가 PI 제어기에 비해 더 우수한 과도응답 및 정상상태응답을 나타냄을 확인하였다.

주요어 : SRM, 3차원유한요소법, 슬라이딩모드제어, PI제어, 철도부하

1. 서 론

최근 환경보호의 문제로 인해 전기철도 및 전기자동차용 견인전동기로 저비용, 고효율 및 고풍력의 전동기에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 철도차량 및 전기자동차용 견인전동기로는 BLDCM(Brushless Direct Current Motor) 및 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)이 많이 사용되고 있다. 하지만 이들은 네오디뮴 등의 희토류계 영구자석을 필요로 한다. 최근 희토류의 공급제한과 가격상승으로 인해 영구자석의 대량공급이 어려워지고 있다[1].

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor; SRM)는 회전자의 구조가 영구자석이나 권선이 없는 간단한 성층구조의 구조강판으로 되어 있어 기계적으로 견고하여 유지보수성이 매우 좋으며, 고정자 극에만 권선을 감기 때문에 엔드턴(end-turn)이 짧아지는 장점이 있다[1,2]. 또한 고정자의 상전류 극성을 바꿀 필요가 없기 때문에 스위칭 소

자의 개수를 줄일 수 있어 구동회로를 경제적으로 구현할 수 있다[3]. 철도 견인전동기는 부하조건이 가혹하고, 콤팩트 하 여야 하기 때문에 이 특성에 적합한 스위치드 릴럭턴스 전 동기의 적용이 적극적으로 검토되고 있다.

SRM은 고정자와 회전자 모두가 극을 가지며, 비선형 특 성을 갖는 한 쌍의 고정자 극을 여자하기 때문에 비선형적 인 자계특성을 갖는다. 토크, 전류, 속도, 및 스위칭 각도의 관계가 비선형적으로 나타나기 때문에 많은 논문들이 전류 와 회전자 회전각도에 따른 자속을 이용하여 토크를 계산하 였고 이들 관계를 룩업 테이블로 나타내어 속도제어를 시도 하였다[4,5]. 룩업 테이블을 이용한 속도제어 기법을 구현하 기 위해서는 이들 매개변수들 간의 관계가 정확히 규명되어 야 한다. 또한, 회전자의 각도와 전류에 따른 자속 곡선을 이용하여 계산한 토크는 실제 측정치와 많은 오차가 있으 르고 정확한 토크값을 얻는 것이 중요하다. SRM의 쇄교 자 속은 고정자 권선에 흐르는 전류와 회전자의 회전각도 모두 에 영향을 받으며 발생토크 또한 비선형성을 갖는다. 이러 한 비선형성으로 인해 다른 전동기에 비해 SRM의 전류와 토크특성을 정확히 나타내는데 어려움이 있다.

SRM의 전류-토크 특성을 모델링하기 위해 많은 연구들이

[†]교신저자 : 서울과학기술대학교 정보통신대학 전기정보시스템공학과
E-mail : k2h1@seoultech.ac.kr

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과

²서울과학기술대학교 정보통신대학 전기정보시스템공학과

2차원 유한요소법을 이용하여 전동기를 모델링 하였다[1-5]. 하지만 2차원 유한요소법은 전동기의 회전자 축방향을 z축으로 고려할 때, z축 방향으로 무한히 긴 모델을 가정하고 있기 때문에 z축 방향 성분의 자속을 0으로 간주한다. 즉, 권선은 z축 방향 성분만 존재하고 따라서 자속은 x축과 y축 성분만 존재한다고 가정한다. 하지만 3차원 유한요소법을 이용할 경우 2차원 모델에서 고려할 수 없는 엔드코일(end-coil)효과를 고려할 수 있어 더욱 정확한 해석이 가능하다. 3차원 유한요소해석은 2차원 모델에 비해 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있지만, 보다 정확한 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 계산이 가능하며, 토크 및 전류응답 또한 더 정확한 값을 얻을 수 있는 장점이 있다[2,6].

전동기의 속도제어를 위해 많이 사용되고 있는 PI 제어기는 구조가 간단하고 안정적이며 적분기의 작용으로 정상상태오차를 제거할 수 있는 장점이 있다. 하지만 PI 제어기는 매개변수의 변동이나 부하 변동과 같은 외란에 민감하게 반응하는 단점 때문에 사용범위가 제한적이다. 최근 견인전동기의 제어 기술 요구사항이 높아짐에 따라 PI 제어기만으로는 그 요구사항을 만족시킬 수 없다. 슬라이딩모드 제어는 가변구조 방식을 택하여 시스템의 응답이 미리 선정된 궤적을 따라 움직이게 된다. 매개변수의 변동이나 외란 등의 변화에도 시스템의 응답은 슬라이딩면 위에 있게 되며 안정한 상태를 유지한다[7-10].

본 논문에서는 월미도 모노레일에 사용되고 있는 100kW급 BLDCM의 사양을 만족하는 SRM을 설계하여 그 특성을 비교한다. SRM의 고정자 형상에 따른 자체해석을 수행하였으며 설계한 SRM의 결과값을 이용하여 속도 제어를 설계하였다. 철도 부하 조건에서 속도 제어기의 성능을 평가하였으며 그 결과를 비교하였다.

2. SRM 설계

2.1 유한요소모델

SRM의 자속, 인덕턴스 및 토크를 구하기 위해 먼저 맥스웰 방정식과 자기벡터포텐셜(magnetic vector potential)을 이용하여 자체분포를 구한다. 자속밀도와 자기벡터포텐셜에 대해 식 (1)과 같은 미분 방정식이 성립한다.

$$\nabla^2 \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (1)$$

여기서 ∇ 는 델 연산자(del operator), $\vec{A}$ 는 자기벡터포텐셜, μ 는 투자율, 그리고 $\vec{J}$ 는 전류밀도를 나타낸다. 성층구조의 철판은 도전율 σ 가 0이며 와류(eddy current)가 생기지 않는다고 가정하였고 히스테리시스 특성은 무시하였다. 코에너지 W_m 은 자계 내에 저장된 에너지와 권선에서 공급한 에너지의 차인 에너지함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\vec{A}) = \int_{vol} \int_0^{\vec{B}} \vec{H} \cdot d\vec{B} dv - \int_{vol} \int_0^{\vec{A}} \vec{J} \cdot d\vec{A} dv \quad (2)$$

여기서 F 는 에너지 함수, $\vec{H}$ 는 자계세기, $\vec{B}$ 는 자속밀도를

나타낸다.

2.2 SRM 설계

Table 1은 100kW급 BLDCM과 SRM의 사양을 비교한 표이다. BLDCM은 월미도 모노레일에 사용된 전동기 사양이다. 표에서 두 전동기는 외경과 성층길이는 같지만 SRM의 축방향 길이(axial length)가 약 0.72배 작아졌다. SRM은 고정자 극에 한쌍의 코일을 집중해서 감기 때문에 엔드코일의 길이를 줄일 수 있어서 전동기의 크기가 컴팩트해진다. SRM의 단면과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 2에 본 논문에서 제안하는 고정자 형상을 나타내었다. Fig. 2(a)는 설계한 SRM의 고정자 형상을 나타낸 그림이다. Fig. 2(b)는 폴슈(pole shoe)를 추가한 형상이며 Fig. 2(c)는 폴슈의 높이를 변화시킨 형상이다.

Table 1 Comparison of BLDCM and SRM

Quantity	BLDCM	SRM
Rated output power [kW]	100	100
Rated speed [rpm]	3000	5775
Rated voltage [V]	750	750
Rated torque [N]	320	165
Outer diameter of stator [mm]	430	430
Length of core [mm]	150	150
Axial length [mm]	300	217
Air-gap length [mm]	2.5	1
Magnet	Neodymium iron boron	
Net weight [kg]	150	163

Fig. 1 Comparison of dimension between BLDCM and SRM

Fig. 2 Different stator pole shapes for SRM

Fig. 3 Inductance profile comparison due to a pole shoe

Fig. 4 Inductance profile comparison due to a different pole shoe depth

Fig. 5 Torque profile comparison due to a different pole shoe depth

Fig. 3은 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에 나타난 두 형상에 대해 인덕턴스를 비교한 그래프이다. 폴슈를 추가한 형상의 인덕턴스가 증가하였다. 시뮬레이션은 일정한 권선 전류에 대해 각각의 회전자 위치에서 자체 해석을 하였다. SRM은 성층 구조로 되어 있어 와류가 발생하지 않으며, 권선의 전류 밀도는 일정하다고 가정하였다. 3상 6/4 SRM의 한 주기는 30°이며, 시뮬레이션은 비정렬 위치인 0°부터 정렬위치인 45°까지 수행하였다.

권선수를 유지하는 범위 내에서 폴슈의 높이를 6mm로 변

Fig. 6 3D FEM mesh for 3 phase 6/4 SRM

Table 2 Parameters of the SRM

Quantity	Value
Outer diameter of stator [mm]	430
Outer diameter of rotor [mm]	238
Stack length [mm]	150
Pole shoe angle [deg]	45
Pole shoe depth [mm]	6
Type of steel	M19

화시켰을 때의 인덕턴스 값의 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 폴슈의 높이를 증가시켰을 때 인덕턴스 값이 증가함을 확인할 수 있으며 이러한 증가는 고정자와 회전자가 만나는 부분에서 특히 뚜렷이 나타난다. Fig. 5는 이때의 토크 특성을 나타낸 그래프로 고정자와 회전자가 만나는 구간에서의 토크가 증가함을 볼 수 있다.

위의 과정을 통해 설계한 3상 6/4 SRM의 회전자 위치 22°에서의 3차원 메쉬를 Fig. 6에 나타내었다. Table 2에 세부 설계 매개변수를 나타내었다.

3. 모델링

3.1 SRM 모델링

발생토크 T_e 는 관성, 마찰계수 및 부하토크를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3)$$

여기서 J 는 관성, B 는 마찰계수, T_L 는 부하토크를 나타낸다.

모델링한 SRM의 동적 모델을 이용하여 슬라이딩모드 제어를 설계한다. 이때, 부하 및 매개변수 변동에 대해 강인한 슬라이딩모드 제어를 설계하기 위해 다음과 같이 시스템의 관성, 마찰계수 및 부하토크의 변화를 가정한다.

$$\begin{aligned} J_{\min} &< J < J_{\max} \\ B_{\min} &< B < B_{\max} \\ T_{L,\min} &< T_L < T_{L,\max} \end{aligned}$$

여기서 첨자 ‘min’과 ‘max’는 각각 최소값과 최대값을 나타낸다. 위의 관계식을 이용하면 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = J_0 \frac{d\omega_r}{dt} + B_0 \omega_r + f \quad (4)$$

식 (4)로부터 f 가 식 (5)와 같이 정의된다.

$$f = \Delta J \frac{d\omega_r}{dt} + \Delta B \omega_r + T_L \quad (5)$$

상태변수를 식 (6)과 같이 정의하고 입력 u 를 발생토크 T_e 로 정의하면 식 (7)과 같은 오차 상태방정식(error state equation)을 얻는다.

$$x = \omega_r - \omega_r^* \quad (6)$$

$$\dot{x} = a_0 x + b_0 u + d f + a_0 \omega_r^* \quad (7)$$

여기서 ω_r^* 는 기준속도, $a_0 = -B_0/J_0$, $b_0 = 1/J_0$, $d = -1/J_0$, $u = T_s$ 이다.

3.2 철도부하 모델링

철도차량의 기관차는 동력이 없는 열차칸을 끌며, 각 열차칸은 바퀴 축에 의해 지지된다. 열차의 주행에 생기는 저항은 주행저항 R_L , 곡선궤도에 의한 저항 R_c , 구배저항 R_g , 관성저항 R_i 가 있으며 이들 각 저항을 모두 합한 것이 총 저항이다. 열차의 주행은 견인력이 총 저항보다 클 때 가능하다.

$$T_L = R_L + R_c + R_g + R_i \quad (8)$$

열차의 주행저항 R_L 은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[11,12].

$$R_L = A_R + B_R \cdot V_R + C_R \cdot V_R^2 \quad (9)$$

여기서 V_R 은 열차 속도, A_R 은 구름저항, B_R 은 기계상수, C_R 은 열차 형상에 따라 결정되는 상수이다. A_R 은 열차속도와

Fig. 7 Mechanical and aerodynamic resistances as a function of speed

무관하며 바퀴와 궤도 사이의 마찰력에 의해 결정된다. $B_R \cdot V_R$ 은 열차속도에 비례하는 항으로 바퀴축의 회전이나 브레이킹 또는 견인력이 전달되는 동안의 기계적 저항(mechanical resistance)을 나타낸다. $C_R \cdot V_R^2$ 은 열차속도의 제곱에 비례하는 항으로 열차의 공력저항(aerodynamic resistance)을 나타낸다. 열차의 속도에 따른 기계저항과 공력저항의 그래프를 Fig. 7에 나타내었다.

4. 슬라이딩모드 제어기 설계

식 (7)과 같이 1차 시스템으로 모델링 된 SRM의 슬라이딩 면은 상태변수 x 의 적분 항을 이용하여 식 (10)과 같이 선택한다[10,13].

$$s = x + c_1 \int_0^t x(t) dt = 0 \quad (10)$$

시스템의 상태가 슬라이딩 면에 도달하여 슬라이딩모드 상태를 유지하기 위한 제어 입력 u 는 다음과 같다.

$$u = u_{eq} + \Delta u \quad (11)$$

여기에서 u_{eq} 는 등가제어 입력을, Δu 는 스위칭 제어 입력을 나타낸다. $\dot{s} = 0$ 과 $f = 0$ 으로 주어진 등가제어조건에 의해 u_{eq} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_{eq} = -\frac{1}{b_0} [(a_0 + c_1)x + a_0 \omega_r^*] \quad (12)$$

스위칭 제어 Δu 는 다음과 같이 설계한다.

$$\Delta u = \psi_1 x + \psi_2 \quad (13)$$

여기서 ψ_1 과 ψ_2 는 스위칭 함수이다. 스위칭 함수는 식 (14)와 같이 슬라이딩모드의 존재조건에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (s^2) < 0 \quad (14)$$

따라서 ψ_1 과 ψ_2 는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_1 < 0 & \text{if } sx < 0 \\ \beta_1 < 0 & \text{if } sx > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \alpha_1 > -\frac{d_0}{b_0} \Delta f_{\max} & \text{if } s < 0 \\ \beta_2 < -\frac{d_0}{b_0} \Delta f_{\min} & \text{if } s > 0 \end{cases} \quad (16)$$

설계한 슬라이딩모드 제어기의 구조를 Fig. 8에 나타내었다. 발생토크 T_e 를 입력 u 로 놓았고, K_f 는 회전자 각도에 따른 인덕턴스의 기울기를 나타낸다.

Fig. 8 Structure of sliding mode controller

Fig. 9는 SRM의 PI 제어 블록도를 나타낸다.

Fig. 9 Block diagram of PI controller for SRM drive

SRM은 각 상에 연결된 각각의 컨버터에 의해 제어된다. 본 논문에서 사용한 3상 비대칭 컨버터를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10 Asymmetric converter for SRM drive

5. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 2장에서 얻은 SRM의 자속특성과 설계모델 및 3장에서 설계한 제어를 통해 속도 제어 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교한다. PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기를 설계하여 그 특성을 비교하였다.

설계된 SRM을 이용하여 속도 제어 시뮬레이션을 수행하기 위해 4.2절에서 설계한 SRM의 회전자 위치에 따른 전류-자속곡선을 이용하여 SRM 모델 블록을 구성하였다. 해석한 SRM의 회전자 위치에 따른 전류-자속 곡선을 Fig. 11에 나타내었다.

전류에 대한 쇄교 자속은 전압 v , 전류 i , 권선의 저항을 R 이라 하면 식 (17)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda(t) = \int_0^t (v - iR) dt \quad (17)$$

SRM의 토크는 식 (18)과 같이 회전자 위치 θ 에 따른 코에너지의 변화율로 나타낼 수 있으며 전류의 부호와는 상관없이 회전자 위치 θ 에 따른 인덕턴스의 변화량에 따라 결정된다.

Fig. 11 Magnetization curve for SRM

$$T = \frac{dW_m}{d\theta} = \frac{i^2 dL}{2d\theta} \quad (18)$$

Fig. 11의 데이터 값과 식 (18)을 이용하여 토크를 계산하였으며 전동기 부하는 식 (8)로 모델링 된 열차 부하를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 12는 기준전류 200A일 때 a상의 전류명령과 실제 전류 응답을 나타낸 그래프이다. 설정한 on/off 스위칭 각도와 기준전류에 따라 상전류 명령을 만들고, 실제전류는 히스테리시스 전류 제어기를 통해 전류명령에 추종하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13은 동일 조건에서 3상의 자속과 전류 및 합성 토크 파형을 나타낸 그래프이다. 설정한 on/off 스위칭 각에 의해 3상이 번갈아 가며 스위칭 되는 것을 확인할 수

Fig. 12 Current response of a-phase under current reference of 200[A]

Fig. 13 Responses of flux, current and torque under current reference of 200[A]

Fig. 14 Torque and speed responses for sliding mode controller and PI controller under speed reference of 50km/h at no-load

있으며, 이때의 자속 및 세 상의 합성 토크가 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 14는 설계한 PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기에 무부하 상태에서의 속도명령 50km/h가 인가된 경우의 토크와 속도 응답 특성을 나타낸 그래프이다. 두 제어기 모두 50km/h에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

다음은 무부하시 구형과 속도명령에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 3000rpm과 -3000rpm의 속도명령을 0.4s마다 번갈아 가며 인가하였을 때 PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기의 속도 그래프를 Fig. 15에 나타내었다. 두 제어기 모두 무부하시 구형과 속도 명령에 대해 추종하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 전동기의 정/역회전, 정/부토크 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

다음은 설계한 SRM을 열차 견인전동기로 사용했을 때의 시뮬레이션 결과이다. 제어기의 설계 매개변수는 무부하시와 같으며, 부하만이 인가된 경우의 특성을 나타내었다.

Fig. 16은 열차부하를 인가하였을 때 속도명령 50km/h에 대한 슬라이딩모드 제어기와 PI 제어기의 특성을 나타낸 그래프이다. 열차가 가속함에 따라 부하는 식 (8)과 같이 증가하게 되며, 이때의 발생토크와 부하곡선을 나타내었다. 부하토크와 발생토크가 같아지는 점에서 속도가 수렴함을 볼 수 있다. 주목할 점은 PI 제어기의 경우, 무부하 상태의 설

Fig. 15 Speed responses for sliding mode controller and PI controller with square wave input

Fig. 16 Torque and speed responses for sliding mode controller and PI controller under speed reference of 50km/h at train-load

정으로서는 속도명령 50km/h에 도달하지 못한다는 것이다. 그림에서 보듯이 열차의 속도는 50km/h 아래에서 수렴한다. 이러한 PI 제어기의 단점은 다음의 슬라이딩모드 제어기를 사용하여 성능을 향상시킬 수 있다. 슬라이딩모드 제어기 또한 무부하시의 설정값을 그대로 사용하였다. 열차 부하 인

가시에도 무부하시와 마찬가지로 50km/h에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 PI 제어기를 사용했을 때 보다 슬라이딩모드 제어기를 사용했을 때 부하변화에 둔감해진 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 SRM을 설계하였고 각 모델의 자계 특성을 비교하였다. 또 PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기를 설계하였으며 그 설계방법을 제시하였고, SRM 설계 데이터를 이용하여 PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기를 통해 각각 속도제어 시뮬레이션 수행하였다. 설계 시뮬레이션에서는 고정자 극 형상을 바꿔가며 설계를 하였고 각 모델의 토크 및 인덕턴스 특성을 비교하였다. 그 결과 기본형상의 모델에 비해 폴수를 추가한 형상에서 향상된 자계특성을 얻을 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 제한된 공간에 권선을 감아야 하는 설계 조건에서 실제 권선이 감기는 공간의 변화 없이 토크 발생량 및 발생구간을 늘릴 수 있는 방법을 제시하였다.

다음으로 제어시뮬레이션에서는 100kW 3상 6/4 SRM을 설계하여 구한 데이터를 이용하여 속도제어 시뮬레이션을 수행하였다. 설계한 PI 제어기와 슬라이딩모드 제어기를 통해 무부하 및 부하시의 속도제어 시뮬레이션과 구형과 속도 명령에 대한 무부하 속도제어 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 PI 제어기의 경우 무부하 조건에서 설계를 한 경우, 부하를 인가하였을 때 과도상태 응답 특성이 나빠지고 속도오차가 발생하는 것을 확인하였다. 같은 조건에서 슬라이딩모드 제어기의 경우 부하를 인가하여도 그 특성의 저하됨이 없이 원하는 속도에 추종함을 확인하였다. 슬라이딩모드 제어기를 사용할 경우 과도상태 응답 및 정상상태 오차가 개선되었음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. Kiyota, A. Chiba (2011) Design of Switched Reluctance Motor Competitive to 60kW IPMSM in Third Generation Hybrid Electric Vehicle, *IEEE Energy Conversion Congress & Exposition*, pp. 3562-3567.
- [2] J. Kołota, S. Stępień (2011) Analysis of 2D and 3D Finite Element Approach of a Switched Reluctance Motor, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 87 NR 12a/2011, pp. 188-190.
- [3] R. Krishnan (2001) *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, CRC Press, USA.
- [4] J. Zhang, H. Zhang, R. Gao, L. Wang (2008) Control Simulation Studies for Switched Reluctance Motor System Based on Finite Element Model, *Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2008. 4th IET Conference on.*, pp. 169-173.
- [5] G. Bhuvaneswari, S.G. Thakurta, P.S. Rao and S.S. Murthy (2006) Modeling of a Switched Reluctance Motor in Sensorless and "With Sensor" Modes, *Journal of Power Electronics*, 6(4), pp. 315-321.
- [6] A. Benhama, A.C. Williamson, A.B.J. Reece (1997) SRM Torque Computation from 3D Finite Element Field Solutions, *EMD97 1-3 September 1997 Conference Publication No. 444 @IEE 1997*, pp. 59-63.
- [7] U. Itkis (1976) *Control Systems of Variable Structure*, John Wiley & Sons, New York.
- [8] H.T. Moon (1993) Discrete Variable Structure Control for Brushless Direct Drive DC Motor Position Control, M.S. thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- [9] D.A. Torrey, X.-M. Niu, E.J. Unkauf (1995) Analytical modeling of variable-reluctance machine magnetization characteristics, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 142(1), pp. 14-22.
- [10] G.S. Buja, R. Menis, M.I. Valla (1992) Variable Structure Control of An SRM Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40(1), pp. 482-487.
- [11] V.A. Profillidis (2006) *Railway management and engineering*, Ashgate Publishing, Ltd.
- [12] Y.G. Kim, S.W. Kim, H.B. Kwon, T.W. Park (2005) Evaluation on the Train Resistances for Korean High Speed Train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 8(5), pp. 405-410.
- [13] S.K. Chung, J.H. Lee, J.S. KO, M.J. Youn (1995) Robust speed control of brushless direct-drive motor using integral variable structure control, *IEE Proc. Electr. Power Appl*, 142(6), pp. 361-370.

접수일(2012년 3월 16일), 게재확정일(2012년 4월 17일)