

180kW급 돌극형 동기발전기의 개념설계 및 정상상태 전자기 해석

*하경덕 *박도영 *황돈하 *김용주 **조삼출
*한국전기연구소 산업전기연구단 **보국전기공업(주)

Conceptual Design and Steady State Electro-Magnetic Analysis of 180kW Alternator with Salient Pole

*Kyoung Duck Ha *Doh Young Park *Don Ha Hwang *Yong Joo Kim **Sam Chool Cho
*Industry Applications Research Center, KERI **Bo-Kuk Electric Ind. Co., Ltd.

Abstract - In this paper, the conceptual design and FE analysis results of salient pole type alternator under no load condition are described. The designed alternator's rating is 180kW, 3-phase, 4pole, 380/220V, 0.8pf, 60Hz. The conceptual design is described by the process of designing the armature, field, and obtaining some of equivalent circuit parameters. The comparison of FE analysis to the designed results of alternator's output voltage value shows a good agreement.

표 1 180kW급 돌극형 동기발전기의 설계사양

정격출력	$P_{e, out}$	180	[kW]
정격역률	$\cos \theta$	0.8	
효율	η	0.85이상	
정격전압	V_e	380/220	[V]
동기속도	n_s	1800	[rpm]
정격주파수	f	60	[Hz]
상수	m	3	[phase]
병렬회로수	a	2	
극수	p	4	[pole]
상당극당 슬롯수	q	4	[slot/phase · pole]
고정자 슬롯수	N_f	48	[slot]
권선간격	β	5/6	

1. 서론

산업체에서의 정전이나 불안정한 전원공급은 생산성을 저하시키고 불량제품의 발생을 증가시켜 제품경쟁력의 향상을 저해하는 주원인으로 여겨지고 있다. 따라서, 대부분의 산업체는 안정적인 전원의 공급을 위하여 무정전 전원장치, 중소형 또는 대형의 자가 발전설비 등을 갖추고 정전 발생시에 대비하고 있다. 일반적으로 중소형 자가발전설비에 가장 많이 채택되어 사용되고 있는 돌극형 동기발전기는 고전적인 방법에 의하여 설계, 제작되고 시험에 의한 품질 검사를 필한 후 고객에게 납품되고 있다. 전자계 해석기법은 경제성과 효율성에 있어서 실제 시험으로 가능한 전기기기의 운전특성 분석방법을 대체할 수 있는 또 다른 분석방법의 하나로서 활용가치를 인정받고 있다.

본 논문에서는 180kW급 돌극형 동기발전기의 개념설계결과 및 설계된 동기발전기의 2차원 전자기 해석결과를 간략하게 소개하고자 한다.

2. 개념설계

2.1 설계사양의 결정

본 논문에서 설계하고자 하는 돌극형 동기발전기의 설계사양은 표 1과 같다.

돌극형 동기발전기의 정격용량(S(kVA))과 전기자 내경(D_{st}), 축 방향 전기자 길이(L_e), 정격회전속도(n_s)에 의해 정의되는 출력계수(G)는 식 (1)과 같다. 4극, 1800kVA이하의 범위에서 돌극형 동기발전기의 출력계수 G는 25000 ~ 90000사이의 값을 갖는다.

$$G = \frac{D_{st}^2 \cdot L_e \cdot n_s}{S} \quad (1)$$

출력계수, 극질(τ_p)과 전기자 길이의 비, 정격용량, 정격회전속도, 통풍구의 수 및 전기자 철심의 적층계수를 적절히 고려하여 D_{st} 와 L_e ($\approx L_e$)는 각각 318(mm)와 330(mm)로 설계하였다. 전기자 외경(D_{so})대 내경의 비를 1.5로 가정하면, D_{so} 은 약 477(mm)정도가 된다.

2.2 전기자 설계

표 1의 설계사양으로부터 q , N_s , β 값을 이용하여 계산한 단절계수 k_p 는 0.9659, 분포계수 k_d 는 0.9577이며 권선계수 k_w 는 0.925가 된다.

극당 자속 ϕ_p 는 식 (2)를 이용하여 계산하면

$$\phi_p = \frac{(V_e/\sqrt{3})}{2.22 \cdot N_{st} \cdot f \cdot k_w \cdot p} \cdot m = 0.056[\text{Wb/pole}] \quad (2)$$

전기자 권선 1도체는 $\phi 1.4[\text{mm}] \times 14$ 개로 구성하면 권선 1도체의 단면적(A_d)는 19.6(mm²), 전기자 권선 1도체의 전류밀도(σ_a)와 전기자 권선의 상당저항($R_{a, 75^\circ\text{C}}$)는 8.72[A/mm²]와 약 16.7(m Ω)이 된다.

전기자 철심의 최대 자속밀도를 1.72(T)로 설계하면 전기자 길이를 알고 있으므로 전기자 철심의 단면적(A_c), 전기자 철심의 높이(h_c), 전기자 슬롯의 높이(h_s), D_{so} 를 계산할 수 있다. 계산된 값은 각각 다음과 같다.

$$A_c \approx 16,200[\text{mm}^2], \quad h_c \approx 49[\text{mm}], \quad h_s \approx 27[\text{mm}], \quad D_{so} \approx 470[\text{mm}]$$

전기자 치폭(w_{st})은 식 (3)에서 계산할 수 있으며, k_t 는 전기자 평균치폭(w_{st})을 계산하기 위한 상수이다.

$$w_{st} = k_t \cdot \frac{\phi_p \cdot p}{N_s \cdot L_e \cdot B_t} = 20.8[\text{mm}] \quad (3)$$

슬롯 내 도체수(N_{cs})와 권선 점적율(S_{cs})을 결정하면 전기자 슬롯폭(w_{ss})를 계산할 수 있다. N_{cs} 를 6, S_{cs} 를 0.32로 결정하여 그림 1과 같이 사다리꼴 슬롯을 설계하였다.

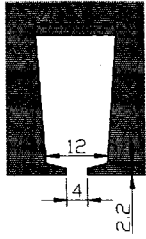


그림 1 전기자 슬롯의 사양

2.3 계자 설계

2.3.1 공극 길이 및 계자외경 설계

돌극형 동기발전기의 공극 자속밀도 분포는 자극의 형상과 극호비(α_p)에 의해 결정되며 α_p 는 0.65 ~ 0.75의 범위에서 결정한다. 동기발전기의 전압파형 내에 포함된 고조파성분은 공극 자속밀도 분포의 영향이 주원인으로 알려져 있어 설계시 극형상 설계시에 주의를 요한다. 고조파 성분을 제거하기 위해 공극 설계시 자극의 중심에서 최소공극을, 자극편 양단에서 최대공극을 갖도록 설계하면 공극 자속밀도 분포 형태를 정현파에 가깝게 조절할 수 있다. 최소공극(δ_{min}) 대 최대공극(δ_{max})의 비는 1.5 ~ 2.25범위에서 선택한다. δ_{min} 을 1.8 [mm], δ_{max} 를 2.7[mm]로 설계하면 계자 외경(D_m)는 314.4[mm]가 된다.

2.3.2 계자극의 설계

δ_{min} 과 δ_{max} 를 고려하여 자극호의 반경(r_B)과 길이(L_p)를 결정하고 제동권선을 배치하기 위한 자극의 높이(h_{ps})와 폭(w_{ps})을 결정한다. 자극부분의 최대 자속밀도(B_p)는 1.8 ~ 2.1[T]의 범위에서 적절한 값을 선택하여 자극철심의 단면적(A_p)을 계산하고 자극의 철심 높이(h_p)와 폭(w_p)를 각각 83[mm]와 93[mm]로 설계하였다. 공극에서 필요한 최소기자력 AT_g 는 식(4)와 같으며, 여기서 k_a 는 극간격, 카터계수, 극호비를 고려한 계수이고 ϕ 는 극호비이다. 계자의 축 방향 길이(L_p)는 L_a 와 같게 설계하였다.

$$AT_g = k_a \frac{\delta_{min} \cdot \phi_p}{\phi \cdot L_p} [AT] \quad (4)$$

정격 계자전류(I_f)와 계자권선수(N_f)는 무부하 기자력을 계산하여 각각 32[A]와 144[Turn]으로 결정하였다. 계자권선으로 4×2[mm](절연물의 두께 포함)의 평각선을 사용하면 계자권선의 폭(w_f), 높이(h_f)는 각각 18[mm], 42[mm]로 그림 2와 같으며 계자권선의 저항은 약 2[Ω]으로 계산되었다. 제동권선의 외경과 수는 L_{ps} 와 h_{ps} 를 고려하여 ϕ 8.32[mm]의 원형도체 7개로 설계하였다. [1-3]

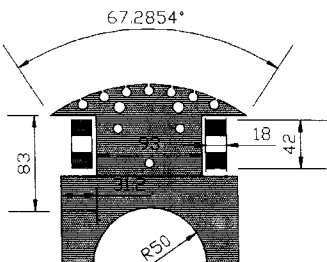


그림 2 계자 1극 및 계자권선의 사양

설계완료된 동기발전기의 1/4 형상은 그림 3과 같다.

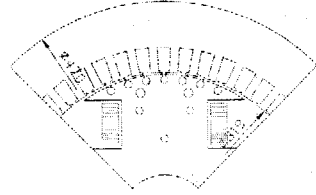


그림 3 설계 완료된 동기발전기의 1/4 형상

2.4 자기회로의 설계 및 회로정수의 계산

2.4.1 자기회로의 설계

무부하시의 기자력 AT_o 은 식(4)에서 계산한 AT_g 와 계자 극, 전기자 철심 및 치에서 필요한 기자력을 합한 것이다. B-H 곡선으로부터 각 부분에서 필요한 자속밀도, 자기강도를 확인하고 그림 4로부터 필요한 자기회로의 길이를 계산하여 AT_o 를 계산할 수 있다.

$$AT_o = AT_g + \frac{H_g \cdot l_g + H_l \cdot l_l}{H_c \cdot l_c + H_p \cdot l_p} [AT] \quad (5)$$

전기자 각 부분의 자기회로 길이는 그림 4와 같다.

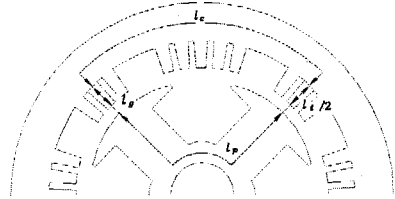


그림 4 전기자 각 부분의 자기회로 길이

전기자 반작용 효과를 고려한 기자력 AT_a 는 식(6)으로부터 계산할 수 있다. k_a 는 최소공극, 최대공극, 극간격, 자극호 등을 고려한 전기자 반작용 계수이다.

$$AT_a = k_a \cdot \frac{N_{ph} \cdot I_a}{p} [AT] \quad (6)$$

동기 임피던스에 해당하는 기자력은 식(4) ~ (6), 전기자 슬롯과 권선 단부의 누설자속을 고려한 전기자 누설 리액턴스(x_l)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$AT_s = AT_o + AT_g \cdot x_l [AT] \quad (7)$$

정격역률시 계자 기자력 AT_f 는 식(8)에서 계산할 수 있으며 k_f 는 역률을 고려한 상수로 1.25를 사용하였다.

$$AT_f = \sqrt{AT_o^2 + k_f^2 \cdot AT_g^2} + 2k_f \cdot AT_o \cdot AT_g \cdot \sin \theta [AT] \quad (8)$$

2.4.2 각종 리액턴스의 계산(4-6)

전기자 슬롯과 권선 단부의 누설자속을 고려하여 나타낸 3상 동기발전기의 x_s 는 식(9)와 같다. 여기서, X 는 리액턴스 계수, λ_i , λ_e 는 각각 슬롯과 권선단부의 비투자도(specific permeance)를 나타낸다.

$$x_l = X(\lambda_i + \lambda_e) \quad (9)$$

직축과 횡축 전기자 반작용 리액턴스 x_{ad} 와 x_{aq} 는 각각 직축, 횡축 자속분포계수 C_{d1} , C_{q1} 와 공극부의 비투자도(λ_a)를 고려하여 식(10)과 같이 나타낸다.

$$x_{ad} = X \cdot C_{d1} \cdot \lambda_a, \quad x_{aq} = X \cdot C_{q1} \cdot \lambda_a \quad (10)$$

직축 자속분포계수 C_{d1} 은

$$C_{d1} = C_m \cdot C_1 \quad (11)$$

여기서 C_m 은 감자계수, C_1 은 기본과 자속밀도 값과 최대 자속밀도 값의 비를 나타낸다.

계자 누설 리액턴스(x_f)는 식(12)로부터 계산할 수

있으며, A_1 은 자극의 누설 자속을 고려한 계수, λ_f 는 계자의 누설을 고려한 비투자도이다.

$$x_f = x_{ad} \left(1 - \frac{0.785A_1^2}{A_d} \right) \quad (12)$$

2.4.3 손실 및 효율의 계산

전기자 동손($P_{cu,a}$)와 철손($P_{fe,a}$)는 다음과 같다.

$$P_{cu,a} = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_{a,75^\circ C}$$

$$P_{fe,a} = V_{c,a} \cdot \delta_{fe,c} + V_{l,a} \cdot \delta_{fe,l}$$

$V_{c,a}, V_{l,a}$: 전기자 철심과 치의 체적

$\delta_{fe,c}, \delta_{fe,l}$: 전기자 철심과 치의 체적당 철손

표유부하손(P_{sc})의 정확한 계산은 거의 불가능하며 설계시에는 일반적으로 $P_{cu,a}$ 의 30 ~ 70% 범위에서 선택한다. 마찰손과 풍손 및 기타손실을 포함한 기계손은 식(13)과 같이 나타내며 k_m 은 기타손실을 고려한 상수를 나타낸다.

$$P_m = k_m \times 1e-4 \cdot v^{2.5} \cdot D_m \cdot \sqrt{\frac{L}{10}} \quad (13)$$

설계한 동기발전기의 총 손실은

$$P_l = P_{cu,a} + P_{fe,a} + P_{cu,f} + P_{sc} + P_m \quad (14)$$

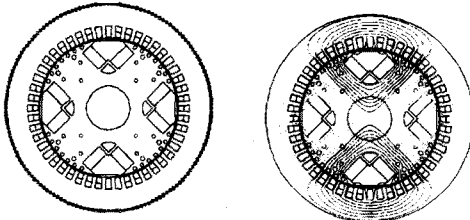
본 논문에서 설계한 동기발전기의 효율은 식(15)로부터 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{e,out}}{P_{e,out} + P_l} \quad (15)$$

위의 식을 이용하여 계산된 동기발전기의 총 손실과 효율은 약 11.87(kW)와 93.8(%)로 계산되었다.

3. 정상상태 전자계 해석

본 논문에서 설계한 돌극형 동기발전기의 정상상태 운전특성을 분석하기 위하여 외부회로와 결합된 2차원 전자계 해석을 수행하였다. 2차원 전자계 해석을 위해 입력한 돌극형 동기발전기의 형상과 경계조건, 해석된 발전기 내부의 등자속선은 그림 5와 같다. 전기자 권선의 상 분포와 병렬회로를 고려하여 전체형상을 모델링하였으며 고정경계조건을 활용하였다.



(a) 2차원 형상 (b) 등자속선
그림 5 동기발전기의 2차원 형상과 등자속선

정상상태 해석결과로부터 얻은 발전기 내부의 공극 자속밀도 분포파형은 그림 6과 같으며 최대 0.8249(T), 평균 0.5317(T)로 계산되었다. 그림 7은 정상상태 운전시의 2차원 전자계 해석결과로부터 얻은 상전압파형을 나타내고 있으며 평균전압은 약 224.86(Vrms)로 계산되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 180kW급 돌극형 동기발전기를 고전적인 설계방법에 의해 설계하고 정상상태 전자계 해석을 수행하였다. 해석결과로부터 계산된 최대 치 자속밀도 값, 전기자 단자전압이 설계값과 매우 근사하게 일치하였다.

본 논문에서 활용한 설계 및 전자계 해석기술에 대한 검증이 완료되면 개방회로, 단락회로 특성, 정격부하 인가시 운전특성, 과도상태 운전특성 등에 대한 전자계 해석을 수행하여 실제 산업현장에서 활용할 수 있는 유용한 연구결과를 도출할 수 있을 것이다.

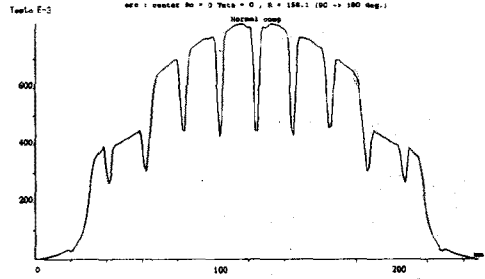
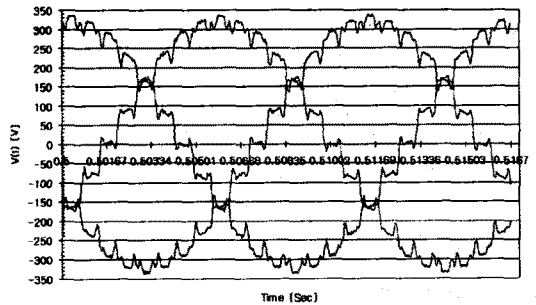
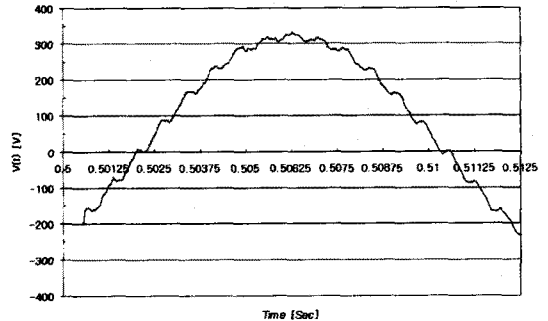


그림 6 공극 자속밀도 분포파형



(a) 3상 전압파형



(b) 스쿠잉향을 고려한 1상 전압파형

그림 7 정상상태 운전시의 상전압파형(2D-FEA)

(참 고 문 헌)

- [1] J. H. Kuhlmann, *Design of Electrical Apparatus*, 2nd ED, John Wiley and Son, 1940
- [2] C. G. Veinott, *Theory and Design of Small Induction Motors*, McGraw Hill, 1959
- [3] Alexander Gray, P. M. Lincoln, *Electrical Machine Design*, 2nd ED, McGraw Hill, 1926
- [4] M. Liwshitz-Garik and C. C. Whipple, *Electric Machinery Vol. 1: Fundamentals and D-C Machines*, D. Van Nostrand Company, Inc., 1946
- [5] P. L. Alger, "The Calculation of the Armature Reactance of Synchronous Machines", *Trans. AIEE*, Vol. 47, pp.493-513, 1928
- [6] L. A. Kilgore, "Calculation of Synchronous Machine Constants - Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics", *ibid*, Vol. 50, pp.1201-1214, 1931