

가스터빈 구동 공냉식 100 MW 발전기의 개념설계

박도영 황돈하 하경덕 김용주
한국전기연구소 발전기진단연구팀

Conceptual Design of 100 MW Turbogenerator

Doh Young Park Don Ha Hwang Kyung Duck Ha Yong Joo Kim
Generator Diagnosis Team, KERI

Abstract - The conceptual design of turbine-driven air-cooled 100 MW generator is presented. The generator's rating is 100 MW 3-phase 2pole 13.8 kV 0.85 pf 60 Hz. The conceptual design is described by the process of designing the stator, rotor, and obtaining some of equivalent circuit parameters.

The design process starts from the output coefficient G, and utilizes the classical design equations with parameters used in the modern designs. The slot dimensions of the stator and rotor are obtained with their respective winding dimensions.

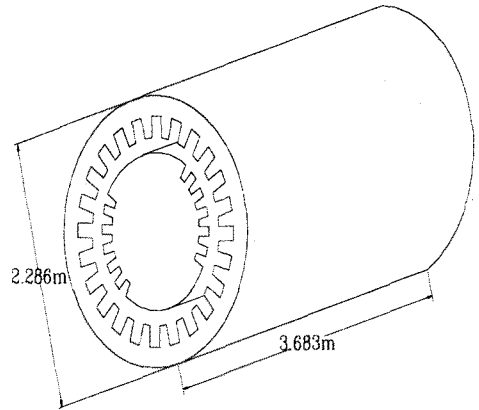


그림 1. 100 MW 발전기의 외형 치수

1. 서 론

근래에 들어 발전소 입지문제, 환경문제 등의 해결과 효율적인 에너지 이용을 위하여 가스터빈으로 구동되는 중소형 열병합(복합화력) 발전소의 건설 필요성이 증대되고 있다. 국내에서는 1998년부터 2010년 까지 26개소의 복합 발전소가 건설될 예정이며, 이들의 계획용량은 총 12 GW에 이른다.

복합화력 발전소 등에는 가스터빈 구동 공냉식 발전기가 사용되는데, 이들은 제작과 운용이 기존의 수소냉각 또는 수소냉각+수냉각 발전기에 비해 용이하므로 더욱 광범위하게 보급되는 추세이다. 효율적인 냉각방식을 채택하는 등의 기술발전이 힘입어 현재 선진 외국에서는 300 MW급까지의 공냉식 발전기를 제작하고 있다. [1] 본 논문에서는 100MW 공냉식 발전기의 개념설계 결과를 소개한다.

2. 개념설계

2.1 외형치수 선정

발전기의 직경이 증가하면 회전자의 forging에 소요되는 경비가 증가하고, 길이가 길어지면 입계주파수가 낮아지는 등의 문제가 발생한다. 한편, 용량 S와 직경 D, 그리고 길이 L에 의해 정의되는 출력계수 G는 식 (1)과 같으며, 대형 터빈발전기에서는 100,000~350,000 사이의 값을 가진다.

$$G = \frac{S}{D^2 L} \quad (1)$$

따라서 적절한 길이와 직경의 비 및 출력계수를 이용하여 외형치수를 구하면 길이는 3.683m(145"), 직경은 2.286m(90")를 얻었다. 그림 1은 설계된 외형치수를 보여준다.

2.2 전기자 설계

2.2.1 권선계수

전기자의 슬롯 수가 증가하면 권선 수가 증가하여 제작경비가 늘어나며 도체의 면적도 감소하여 효율이 낮아지고 발열이 증가하므로 슬롯 수 N_s 는 60으로 설계하였다. 2개의 병렬회로를 가지며 슬롯당 도체수를 2개로 하여 상당 직렬 턴수 N_{ph} 를 10으로 설계하였으며, 권선 피치는 5/6로 설계하였다.

2.2.2 전기자 단면 설계

공극에서의 평균 자속밀도는 다음 식 (2)의 전압 방정식에서 구해지며, 이를 이용하여 매극당 자속 ϕ 를 구할 수 있다. 식 (2)에서 K_w 는 권선계수, D_g 는 공극의 평균직경, 그리고 P는 극수이다.

$$V_{rms} = \frac{\omega \cdot k_w \cdot N_{ph} \cdot B_{avg} \cdot \pi \cdot D_g \cdot L}{\sqrt{2P}} \quad (2)$$

공극의 길이 l_g 는 기계적으로는 최소한 0.5" 이상이 되어야 하며, 요구되는 SCR(Short Circuit Ratio) 값에 의해 결정된다. SCR값이 크면 공극이 커지고 전압 변동율이 좋아지지만 도체가 많이 소요되어 제작비가 증가한다. 여기서는 SCR의 값을 약 0.5로, X_{ad} 의 값을 약 2 p.u.로 하기 위하여 공극의 길이 l_g 를 1.75"로 하였다.

매극당 자속과 전기자 각 부분에서 허용되는 자속밀도 값을 고려하고, 또한 일반적으로 사용되는 상수들,

예를 들면 적층의 점적울 등을 사용하여 그림 2에 나타낸 전기자 부분의 설계를 수행하였다. 그림 2에서 D_b 는 전기자 내반경, h_c 는 철심의 깊이, h_2 는 권선부분의 높이, 그리고 h_1 은 도체 상부의 높이이다.

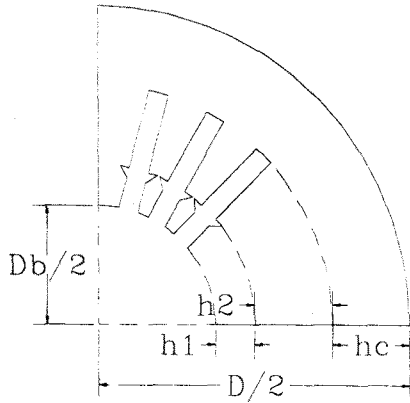


그림 2. 100 MW 발전기 전기자 단면의 1/4 형상 ($D_b=42.5''$, $h_1=0.5''$, $h_2=8.398''$, $h_c=14.725''$)

2.2.3 전기자 슬롯 설계

치폭 W_t 는 아래의 식 (3)과 같이 구한다. 식 (3)에서 L_{ef} 는 덕트를 고려한 유효길이, S_{tk} 는 점적울, 그리고 S_{td} 는 치부분에서의 최대 자속밀도이다.

$$W_t = \frac{\Phi \cdot P \cdot \pi}{2N_s \cdot L_{ef} \cdot S_{tk} \cdot S_{td}} \quad (3)$$

간접 냉각방식인 100 MW 공냉식 발전기의 전기자 도체에서의 전류밀도는 1500 A/in^2 정도가 적절하므로 이에 따라 소선의 치수 및 갯수를 결정하였다. 전기자 슬롯과 이에 삽입된 권선의 단면도는 그림 3과 같으며, 슬롯의 높이 ssd 는 식 (4)에서 구한다.

$$ssd = (2S_{gins} + S_{sper} + 2N_{strndd}(S_{strndt} + S_{strndi}) + csor + asb + tcs + 2dst + wedg + bst + fslot + talww) \quad (4)$$

식 (4)에서 S_{gins} 는 대지절연(Ground Insulation), N_{strndd} 는 길이 방향의 소선의 갯수, S_{strndt} 는 절연물 포함한 소선의 두께, S_{strndi} 는 소선 절연(Strand Insulation), $ssper$ 은 스페이서(spacer) 두께, $csor$ 는 cross-over두께, tcs 는 열전대 스트립(strip) 두께이다.

2.3 회전자 설계

2.3.1 계자설계

공극에서의 극당 암페어-턴수 AT_g 는 식 (5)와 같이 구해지며, 여기서 B_p 는 공극에서의 최대 자속밀도, k_g 는 슬롯 피치와 카터계수를 고려한 공극계수이다.

$$AT_g = \frac{B_p \cdot l_g \cdot k_g}{\mu_o} \quad (5)$$

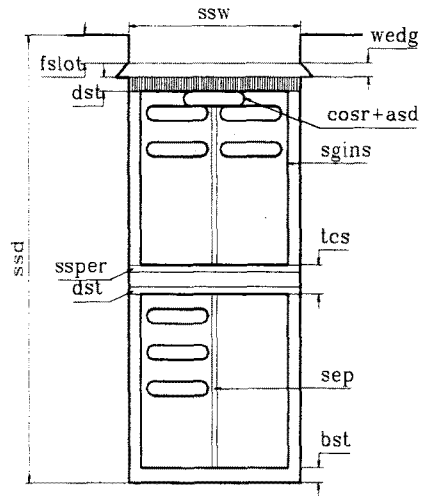


그림 3. 전기자 슬롯 및 권선의 단면

식 (5)에서 구해진 AT_g 를 이용하여 포화를 고려한 극당 무부하 암페어-턴수를 구하여 정격 계자전류 I_f 를 292 A와 계자턴수 N_f 를 118턴으로 결정하였다. 전체 슬롯 수는 극당 14개이고, 최외곽 슬롯에는 16턴, 나머지 슬롯에는 17턴을 가지도록 하였다.

그림 4에서 회전자 슬롯의 최외곽 슬롯의 높이가 작은 이유는 이 부분에서도 다른 슬롯과 같은 높이를 가지게 되면 자속통로가 좁아지므로 포화가 발생하기 때문이다. 따라서 일반적으로 최외곽 슬롯과 그 옆의 슬롯에서 한 턴정도를 적게 가지게 된다.

2.3.2 회전자 단면 및 슬롯 설계

매극당 자속과 회전자 각 부분에서 허용되는 자속밀도 값을 고려하고, 또한 일반적으로 사용되는 상수들을 사용하여 2.2절과 유사한 방식으로 그림 4에 나타낸 회전자 부분의 설계를 수행하였다.

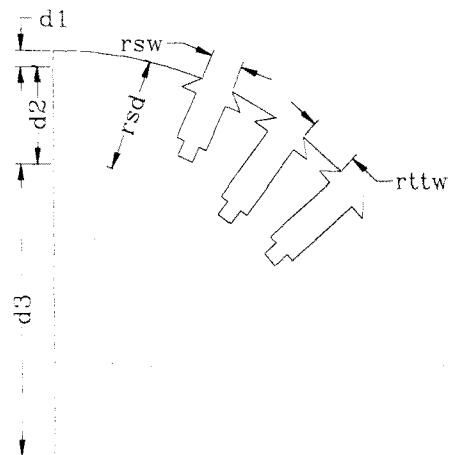


그림 4. 100 MW 발전기 회전자 단면의 1/4 형상 ($d_1=1''$, $d_2=5.575''$, $d_3=12.93''$, $rsd=6.575''$, $rsw=1.5278''$)

회전자 치의 상단부 폭 $rttw$ 는 식 (6)과 같이 구한다. 치와 슬롯 폭은 지나친 기계적 스트레스를 피하기 위하여 적절한 배분이 필요하다. 식 (6)에서 N_{ras} 는 회전자 apparent 슬롯 수, L 은 회전자 길이, 그리고 r_{tfd} 는 회전자 치 상단부의 자속밀도이다.

$$rttw = \frac{2\phi}{N_{ras} \cdot r_{tfd} \cdot L} \quad (6)$$

회전자의 슬롯과 이에 삽입된 권선의 단면도는 그림 5와 같다. 슬롯의 높이 rsd 는 식 (7)에서 구한다.

$$rsd = rwdg + (rwdcud + rwdintins) \cdot rslnt + rsltd + rsltl + rsltpkd + rsltpkd + rwdga \quad (7)$$

식 (7)에서 $rsltd$ 는 슬롯 라이너의 두께이며, $rwdcud$ 는 절연물을 포함한 소선의 두께, 그리고 $rwdintins$ 는 소선간 절연두께이고, 소선단면의 치수는 계자 전류밀도, 계자턴수 등을 고려하여 결정한다.

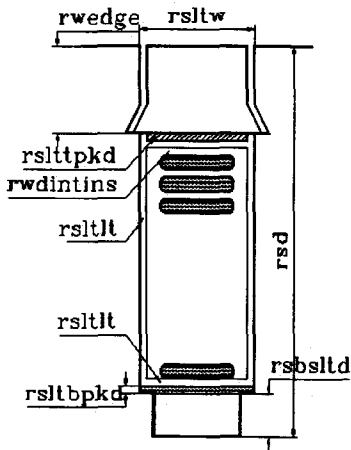


그림 5. 회전자 슬롯 및 권선의 단면

2.4 회로정수

동기속도에서 전기자의 매극당 쇄교자속 ϕ_a 에 의해 유기되는 상전압 E_a 는 식 (8)과 같으며, 전기자 반작용 리액턴스 X_{ad} 는 식 (9)와 같다.

$$E_a = \frac{5.4 \cdot 2\pi f \cdot \mu_o \cdot D_g \cdot L \cdot (k_w N_{ph})^2 \cdot I_a}{\sqrt{2g} \cdot P^2} \quad (8)$$

$$X_{ad} = \frac{2Af \cdot \mu_o \cdot D_g \cdot L \cdot (k_w N_{ph})^2}{g \cdot P^2} \quad (9)$$

또한 전기자 슬롯과 권선단부의 누설자속을 고려하여 [2] 전기자 누설 리액턴스 X_l 을 구한다. 같은 방법으로 회전자 슬롯과 계자 권선단부의 누설자속을 고려하여 계자 누설리액턴스 X_f 를 구하여 식 (10)과 같이 전기자 측으로 환산한 X_f 를 p.u. 값으로 구한다.

$$X_f = \frac{\sqrt{3} I_a}{V_L} \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{K_w N_{ph}}{K_{fd} N_f} \right)^2 \cdot x_f' \quad (10)$$

전기자 권선의 저항 R_a 는 전기자 권선의 길이를 고려하여 상온에서의 저항을 구한 다음 운전온도(75°C)에서의 값으로 환산하였다. 계자권선의 저항은 기본적으로 전기자 권선의 저항값을 구하는 방법과 유사하게 구하지만, 권선에 냉각을 위한 통풍구가 있으므로 이의 면적을 제외한 도체의 면적만을 고려하여 저항값을 구하였다. 운전온도에 따른 저항값을 구하고, 이를 다시 전기자측으로 환산하여 p.u.값인 R_f 를 구하였다.

위에서 구한 값들을 표시하면 표 1과 같다.

표 1. 100 MW 발전기의 회로정수

회로정수	값 (p.u.)
X_{ad}	1.9436
X_l	0.279
R_a	0.033
X_f	0.0286
R_f	0.0014

3. 결 론

본 논문에서는 복합화력 발전설비에 채용되는 가스터빈 구동 공냉식 100 MW 발전기에 대한 개념설계 수행 결과를 소개하였다. 개념설계는 고전적인 설계 방식들을 이용하였으며, 절연물 두께 등의 정수값들은 근래의 발전기에 사용되는 값을 사용하였다.

향후 본 개념설계를 바탕으로 이의 성능해석을 수행할 예정이며, 특히 과도상태 해석을 중점적으로 수행할 것이다. 권선의 절연설계, 발전기의 기계적 및 열적인 설계가 추가로 수행되면 보다 상세한 설계가 이루어질 것으로 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] C.-E. Stephan, J. Baer, R. Joho, and R. Schuler, "Advanced Technologies for Larger Air-Cooled Turbo-Generators with Highest Unit Ratings", Proceedings of CIGRE'96, Paper Number 11-101, 1996
- [2] M. Liwischitz-Garik and C. C. Whipple, *Electric Machinery Vol. 1: Fundamentals and D-C Machines*, D. Van Nostrand Company, Inc.
- [3] R. Fenton, G. Ghanime, E. Kazmierczak, and R. Nold, "Static Starting of Gas Turbine Driven Generators Mechanical and Electrical Design Considerations", Proceedings of CIGRE'96, Paper Number 11-103, 1996
- [4] P. L. Alger, "The Calculation of the Armature Reactance of Synchronous Machines", Trans. AIEE, Vol. 47, pp.493-513, 1928
- [5] L. A. Kilgore, "Calculation of Synchronous Machine Constants - Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics", *ibid.*, Vol. 50, pp.1201-1214, 1931