

발전기 운전온도가 고정자 구조물 응력변화에 미치는 영향에 관한 고찰

이범태*,심시동*조진영*,김희겸*
*한국발전교육원
e-mail:trier0215@kpli.co.kr

A Study on the Effect of Generator Operating Temperature on the Stress Variation of Stator Structures

Beomtae Lee*, Sidong Sim*,Jinyoung Cho*,Kim heakyum*
*Korea Power Learning Institute

요 약

대용량발전기는 전자력에 의한 진동과 누설자속에 의한 단부측 과열현상 및 고정자 철심의 이완현상에 대하여 Simulation을 통하여 검증되어 설치되지만 제작 방법과 작업과정의 차이에서 가져오는 변형·오류 부분은 설비가 운용되기 전에 검증하기란 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 최근 새롭게 설계·설치되고 있는 열병합 및 복합발전설비의 발전기에서 관통볼트의 절손 및 회전자의 Baffle 고정볼트의 절손, 부분방전 등 고정자와 회전자의 손상이 지속적으로 발생하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 발전기 특성을 고려하여 제작된 구조물의 재질이 갖은 기동·정지시 운전온도에 따라 열팽창이 상이하여 발생하는 응력으로 발전기 관통볼트의 절손 및 철심과 슬롯 내의 권선간의 마찰에 의한 손상 등의 원인을 분석하기 위해 철심과 권선, 관통볼트의 변화량을 MATLAB으로 상관관계를 분석하고 고장원인을 고찰하고 발전기 운전온도의 범위를 제안였다.

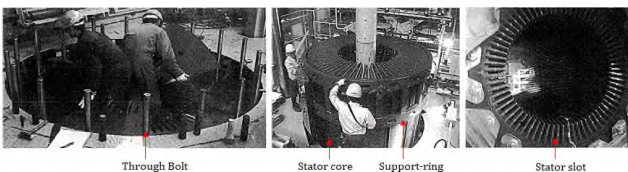
1. 서론

최근 국내의 열병합 및 복합발전설비에 설치되고 있는 발전기 고정자는 철심을 적층한 구조물을 고강도 비자성강(PCD23)의 관통볼트에 의해 용량별로 설계규정의 토크로 조여주고, 성형된 권선이 고정자 슬롯 내에 절연구조와 함께 하나의 커다란 구조물을 이루어 제작되었다. 따라서 발전기는 체적력과 중력 및 자력이 함께 복합적으로 작용하는 구조물로 운전 중 발생하는 부분들은 주기적인 계획예방점검을 통하여 진단, 보완하며 운용되고 있다. 또한 철심의 온도상승은 슬롯(Slot)의 수량과 Slot Teeth 부분의 조합방법에 따라 달라질 수 있지만 전자력에 의한 진동과 Plate의 과열현상은 철심의 적층방법에 따라 영향을 받지 않을 수 없다.

따라서 철심의 두께와 적층 방법에 따라 철심의 이완 및 쏠림현상이 발생할 뿐만 아니라 관통볼트의 절손현상과 권선 단부측에서 파우더(Powder)가 빈번히 발생하고 있는 실정이다.

Frame은 철심과 진동을 흡수할 수 있는 절연구조로 되어있으나 기동 후 열팽창을 고려하여 중형발전기의 경우 기초구조물로부터 약0.2mm의 간극을 두고 설치하여 부응하도록 하였지만 철심을 고정한 관통볼트는 발전기 기동·정지시의 온도변화로 인한 열팽창·수축시 응력과 변형을 고려하여 토크를 설정하지 않을 수 없다.

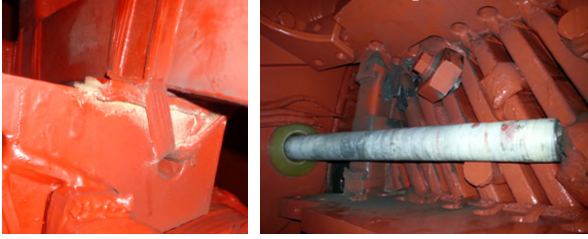
지나친 관통볼트의 조임토크는 탄성력이 없이 설치된 철심의 소성변형을 가져오고, 관통볼트의 인장력과 탄성한도 내에서 열팽창·수축은 반복된다. 이러한 현상은 관통볼트의 절손과 고정자 권선 절연계의 Girth Crack으로 심각한 권선의 손상을 초래하기도 한다. [그림2]는 200[MW] 발전기 고정자 관통볼트(M42, Neck 직경 34.9[mm])의 피로파괴에 의한 절손



[그림1] 발전기 고정자 철심의 적층1)

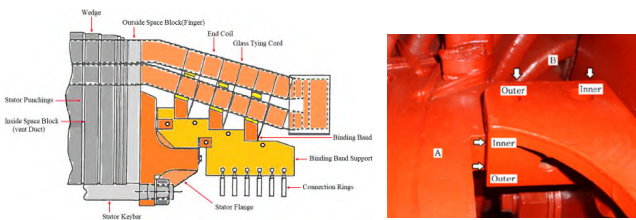
1) Turbine Generator Manual(Melco O & M)

사례이다.



[그림2] 발전기 고정자 Powder 발생과 관통볼트(M42) 절손 사례

또한 단부측의 권선에 발생한 파우더와 변형여부를 확인하기 위하여 권선을 지지하고 있는 Binding Band Support Block과 Stator Flange와의 Frame간의 간격을 정기적으로 관리하고 있다.

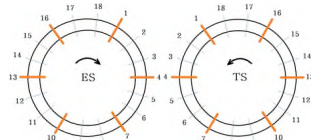
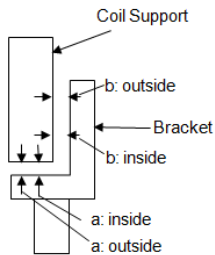


[그림3] 발전기 단부권선의 구조와 Support Block 간격측정 위치

다음의 표는 200[MW] 공랭식 발전기의 Major Initial 분해점검 시 측정된 예이다.

[표1] Frame & Bracket의 Support Block 부분측정(예)

Bracket No.	A		B		
	Inside	Outside	Inside	Outside	
ES	1	2.90	3.00	6.20	6.50
	4	2.20	2.80	6.30	6.50
	7	2.00	2.10	6.20	6.40
	10	2.10	1.90	6.30	6.10
	13	1.60	1.90	5.60	5.40
	16	3.00	3.00	5.30	5.40
TS	1	2.60	3.00	4.90	5.00
	4	1.90	1.90	4.70	4.60
	7	1.50	1.80	5.00	5.00
	10	1.90	1.90	4.90	4.90
	13	2.10	2.40	5.80	5.85
	16	2.80	2.60	4.90	4.80



※ 허용치 제시치 예 (MELCO 제작사)
 - A 기준 < 1[mm]
 - B 기준 < 5[mm]

이는 발전기의 잦은 기동·정지로 인한 온도변화가 철심과 관통볼트, 고정자 권선 간의 열팽창의 차이로 나타나는 구조물의 변형 정도를 확인하기 위한

기초자료이다.

2. 본론

2.1 고정자 설계 운전온도

발전기의 고정자는 권선의 입구 냉각수 온도 46℃, 최고온도상승을 34℃로 출구의 온도를 80℃를 넘지 않고, 권선입구의 냉각수 압력을 1.6~2.0[kg/cm²]의 조정범위에서 운전한다. [표2]는 2극 발전기 용량별 냉각방식을 적용한 예이다.

[표2] 발전기 용량별 냉각방식 적용 예^[1]

용량 [MVA]	수소가스 압력 [kg/cm ²]	회전자 권선		고정자	
		보통냉각	직접냉각	권선	프레임구조
50	공기	보통냉각	직접냉각	보통냉각	보통형 (冷却器 四隅縦置)
100	2	Gap Pick up 직접 냉각방식	mismatching 방식	2경로 수냉각방식	
150					
300					
500	3.2	matching 방식	1경로 수냉각방식	Twin Dome (二重冷却器 上部置)	
800	4.2				
1,000	5.3	강화 pick-up식 직접냉각			

2.2 고정자 구조물의 재질과 특성

최근 국내에 복합화력발전기에 주로 설치되어 사용하고 있는 고정자의 관통볼트 PCD23의 재료의 사양은 [표3]과 같다.

[표3] PCD23의 재료사양

항복강도[Mpa]	≥395	면적감소[%]	≥50
인장강도[Mpa]	≥520	경도[Brinell]	≤330
신장도[%]	≥30	투차율[μ]	≤1.05

관통볼트의 피로파괴된 재질을 X선 방사 분광법(X-ray Emission Spectroscopy)에 의해 성분을 분석한 결과의 평균값으로 [표4]와 같다.

[표4] 금속물질의 함유율

철심(core)		관통볼트		권선(Coil)	
물질	함유율[%]	물질	함유율[%]	물질	함유율[%]
C	0.003	C	0.23	Cu	99.8
Si	3.34	Si	2.14		
Mn	0.15	P	0.009		
Al	1.03	S	0.003		
Fe	95.477	Mn	24.01		
		Cr	5.83		
		Ni	3.05		
		Fe	64.728		

2.3 고정자 구조물별 평가 재질 선정

본 논문에서는 Kawasaki Steel에서 제공하고 있는 다음 선형회기식²⁾의 고망간(Mn)강의 열팽창계수 산

출값을 표준으로 관통볼트의 열팽창계수값을 산출하였다.

$$\beta = 17.66 + 3.82C(\%) - 0.22Mn(\%)$$

구조물의 절연물과 Wedging 작업시 압력에 의한 선펡창 저항은 고려하지 않았다. 금속 이외의 재질에 관한 열팽창은 금속구조물과의 연구가 추가로 필요하다. 본 고찰에서는 체적팽창보다는 코어 방향으로의 선펡창이 구조물 간에 미치는 영향을 보기 위해 재질별로 [표5]와 같은 열팽창계수 값으로 분석하였다.

[표5] 발전기 구조물별 열팽창계수

구조물별	열팽창계수 [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$]	코어의 길이
고정자 철심	12×10^{-6}	200[MW] 발전기 8,160mm
관통볼트(PCD23)	13.256×10^{-6}	
고정자 권선	16.5×10^{-6}	

철심은 JIS C 2552의 규정에 따른 무방향성규소강대를 사용하지만 제작과정에서 철심과 표면 절연층의 두께와 적층 방법에 따라 코어의 전체 길이가 차이는 가져올 수 있다. 발전기 코어 슬롯 내의 권선 작업시 고정압력(tension)은 현재 국내 복합 및 열병합발전설비에 설치되어 있는 200[MW] 공랭식 발전기 코어의 길이 8,160[mm]를 기준으로 하고 비교하였다.

2.4 고정자 구조물 간의 응력변화의 영향

2.4.1 고정자 철심과 권선간의 응력

고정자는 권선의 제작과정 중 소선 층간의 절연물의 두께 및 Top bar와 Bottom bar간 절연물의 두께, 권선의 결합상태에 따라 슬롯 내에서 불균일한 마찰력이 발생할 수 있다. 이것은 부하의 증감에 따른 권선 온도의 변화와 냉각 가스의 온도차, 철심과 권선의 열팽창계수의 차에 의하여 Slot 내의 Nipple Spring과 웨지(wedge)의 구속력에도 불구하고 코어 내에서 슬롯 방향으로 응력이 발생하여 자기적인 진동과 함께 Girth Crack이 발생한다. 특히 코일의 길이가 길거나 철심의 길이가 3,960[mm](156 inch)이상의 것에서 발생하기 쉽다^[1]. 그러나 발전기 권선은 부하에 따라 열팽창을 일으키지만 절연물은 구리권선 보다 온도가 낮고 슬롯에 고정되어 있어서 권선의 길이 만큼 팽창하는 것은 곤란하여 오히려 슬롯 내의 철심 단부 부분에서 Girth Crack이 발생하기 쉽다. 권선의 주재료인 구리의 경우 열팽창계수에 영향을 미치는 주요 인자는 결정립의 크기³⁾이므로 발전기

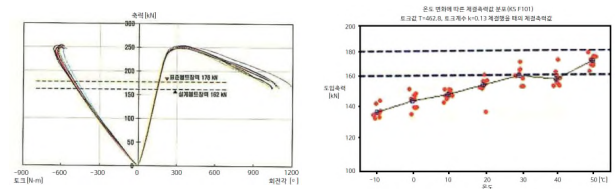
Stator Core의 길이만을 고려하였다.

2.4.2 고정자 철심과 관통볼트 간의 응력

발전기의 잦은 기동·정지는 재료의 인장과 압축으로 인한 피로강도를 저하시켜 반복하중에 의한 피로 파괴를 가중시킨다.^[2] 이는 온도가 높아질수록 토크 계수값은 점차 감소하는 경향을 보이며 토크 계수가 온도에 민감하게 반응함을 확인하였다.^[3] 즉 온도의 변화는 구조물의 재질로 팽창계수의 확산된 길이 만큼의 응력이 발생하여 관통볼트에 토크량의 변화를 줄 수 있다는 것이다.

2.4.3 관통볼트의 응력과 조임토크 변화

발전기 코어를 고정해 주기 위한 관통볼트는 코어의 온도 변화에 의해 수축·팽창을 하는 과정에서 내력이 발생한다. 이러한 내력에 대응하기 위해 관통볼트의 한쪽에 Spring을 넣어 구속압력을 보완해 주기도 하지만 열변형을 고려하여 Spring 없이 너트로 고정해 주는 형태도 있다. 이러한 볼트 체결시 현장의 온도가 낮을수록 같은 축력을 도입하기 위해서는 더 큰 토크값이 필요하게 된다. 이것은 온도변화에 따른 토크계수의 상승 때문이다.^[3] [그림5]는 온도변화에 따른 표준볼트장력(178kN) 도입시 토크값을 분석한 예이다.



[그림5] 온도변화에 따른 필요 토크값과 도입축력변화⁴⁾

2.5 MATLAB을 이용한 구조물 온도변화에 따른 상관관계 분석

2.5.1 철심과 고정자 권선의 열팽창 변화

발전기 고정자 철심의 건전성 평가는 고정자 권선의 절연파괴시 코어의 와전류에 의한 철심의 용융 방지와 코어의 미소한 손상에 대한 추적관리로 EL-CID⁵⁾ 시험이 진행되고 있다. 발전기의 운전 중 헐거워진 웨지는 코일을 슬롯 내에서 유동시켜 주절연을 파괴할 수 있으므로 주기적으로 상태를 시험하여 조임성에 대한 교정 시기를 결정한다.

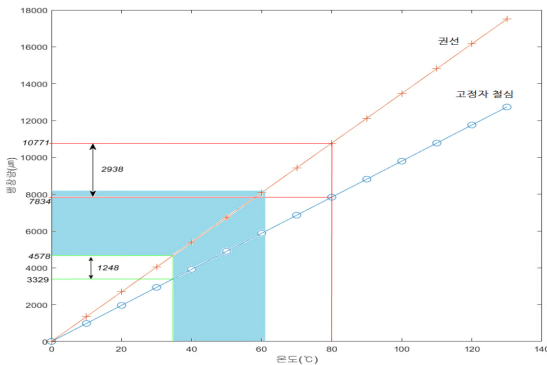
두께의 영향”. 전남대 황술기. 2011년

4) “현장 온도특성을 고려한 고력볼트 체결성능에 대한 실험적 연구”강구조연구소 김진호 외.2007

5) Electromagnetic Core Imperfection Detect

2) 川崎製鐵技報 Vol.13(1981)No.3 高 Mn 非磁性鋼の開發
3) “구리와 은 박막의 열팽창계수에 미치는 결정립 크기와 박막

운전 시간이 길고 온도가 높을수록 코어와 권선 간의 열팽창의 차이는 증가하여 Nipple Spring의 탄성은 저하되어 슬롯 내에서 권선은 더욱 유동적일 수밖에 없다. [그림6]은 80℃시 팽창차와 34℃시 팽창차 간에 1.689[mm]의 차이를 보이지만 실제로는 권선의 Wedging 작업으로 이보다 적을 수는 있지만 온도 상승시에는 이 또한 장담할 수 없는 실정이다. 따라서 Frame과 Bracket의 Support Block을 체결하지 않고 간극을 주기적으로 측정하여 관리할 필요가 있다.

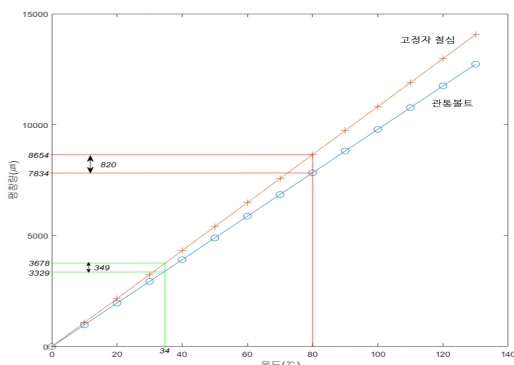


[그림6] 철심과 권선의 열팽창 비교

즉, 제작사의 권고치와 같이 축방향의 측정허용값 1[mm]를 초과할 경우와 웨지의 조임성 평가를 종합하여 판정하고, 발전기의 냉각수의 온도를 조정하여 운전온도를 열팽창 차이로 인한 팽창 간격이 1[mm]를 초과하지 않는 61[°C] 이내에서 운전할 필요가 있다.

2.5.2 철심과 관통볼트의 열팽창 변화

고정자 철심과 관통볼트 사이에서의 정상적인 권장 온도 범위에서 열팽창은 [그림7]에서와 같이 80℃시 팽창차와 34℃시 팽창차 간에 0.471[mm] 만큼의 관통볼트에서 토크 조임력이 상승할 뿐만 아니라 온도 저하시 철심이 이완되어 흘러내리는 원인이 되어 냉각 가스의 순환에 장애요인이 될 수 있다.



[그림7] 철심과 관통볼트의 열팽창 비교

이는 발전기의 온도가 높을수록 관통볼트의 조임력은 상승하는 반면 장기적인 운전 후 관통볼트의 복원력이 저하될 경우 철심의 이완 현상으로 나타나기 때문이다. 따라서 관통볼트의 토크조임력은 발전기의 용량과 코어의 길이에 따라 달리 계산할 필요가 있다.

3. 결론

본 논문에서 최근 다수의 복합발전소에서 설치되고 있는 발전기 고정자 철심의 관통볼트 절손 원인과 고정자 철심 슬롯 내에서 권선의 마찰에 의한 손상 원인을 규명하기 위해 철심과 고정자 권선, 철심과 관통볼트 간의 열팽창의 차이로 나타나는 구조물의 변화를 분석하고, 열팽창이 구조물에 미치는 영향에 관하여 고찰하여 다음과 같이 제안한다.

- 1) 발전기 운용시 철심의 열팽창을 고려하여 최초 상용운전 후 관통볼트의 토크조임력을 재점검할 필요성이 있다.
- 2) 권선이 슬롯 내부에서 온도변화에 따라 유동적일 수밖에 없는 구조라면 고정자 Frame과 Bracket의 Support Block의 변형 여부를 주기적으로 관리하여 웨지 내부의 Nipple Spring Tension의 이완 여부와 웨지의 위치별 적정 압력의 자료화의 필요성이 대두되었다.
- 3) 발전기 정지시 내부의 최소 유지온도를 34℃로 하고, 운전시 최대허용온도는 80℃를 초과하지 않도록 하여야 한다. 즉 발전기 권선 절연등급인 B종의 평균 권선온도 상승값 80℃(F종은 100℃)보다 낮게 운전하여 주변 온도를 감안한 30±15℃^[4]를 초과하여 운전하는 것은 제한할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 발전기점검보수기술. 한국전력공사 발전부
- [2] ASME B & PV CODE 해설집, Section II 분야 p149. 1996. 한국전력공사 전력연구원
- [3] 「현장 온도특성을 고려한 고력볼트 체결성능에 대한 실험적연구」 RIST 연구논문 제21권4호, 2007 김진호외 2인
- [4] 電機設計學. 동일출판사, 1994 원중수 p26 JEC-146(1976) & JEC-204(1978) 전기기기의 온도 상승한도