

발전기 고정자 이완에 의한 소음발생 고찰

The Case Study of The Generator Noise generated by Stator Looseness

유무상† · 한승우* · 노철우* · 류길수* · 오승태*

Mu-Sang Yoo, Seung-Woo Han, Cheol-Woo Roh, Kil-Su Ryu and Seung-Tae Oh

Key Words : Generator(발전기), Stator(고정자), End Winding(권선단부), Electromagnetic Noise(전자기음), Line Frequency(계통 주파수), Modal Test(모달 시험)

ABSTRACT

Generator is the main equipment of a power plant that generates electric power. The line frequency is 60Hz, since that is operated at 3600rpm in fossil power plant. Therefore, the specific frequency 120Hz by the electromagnetic excitation force is generated inherently. If the looseness of stator at generator happens, abnormal sound that has 120Hz and the harmonic frequency is emitted from generator frame. In that case, binding of end-winding or re-wedging is needed for the reduction of sound level. In case of severe level of sound, belly band can be additionally installed at core. In this paper, the characteristics of generator sound is described and modal data is analyzed after installation of belly band.

1. 서 론

발전기는 발전설비에서 전기를 직접적으로 생산하는 기기로 터빈의 구동에 의하여 회전하게 된다. 따라서 발생하는 진동 및 소음 현상은 전기적인 문제점 뿐만 아니라 기계적인 문제점을 동시에 가지므로, 불균형(Unbalance) 및 러빙(Rubbing)과 같은 기계적인 진동현상과 로터의 열적인 진동 등 다양한 현상이 발생하여 진단에 어려움을 겪게 된다.

또한, 발전기 고정자(Stator)는 터빈과 달리 다양한 구성품 (코어, 코일, 웨지등)들이 용접되지 않고 끼워 맞춤 및 절연체로 체결되기 때문에, 운전 중 진동 및 절연체의 고온 열화 등으로 그 구성품 간의 체결력이 약해지게 된다. 이러한 이완(Looseness)현상은 기계적인 진동 특히 전기적인 120Hz 가진력에 의한 움직임이 증가하게 되어, 소음이 발생할 뿐만 아니라 권선간 또는 부품간에 마찰이 발생하여 전기

적인 아크 및 손상이 되기도 한다. 특히 권선단부에서의 진동 문제점이 많이 발생하기 때문에, 권선단부에서의 120Hz 고유주파수 존재여부를 확인하기 위한 진동성능시험을 주기적으로 시행하여 그 열화 경향을 관리하고 있다.^{(1),(2)}

본 논문에서는 발전기 고정자 이완에 따른 소음 발생 시의 진동 및 소음신호 특성을 고찰하고, 권선단부 바인딩(Binding) 및 벨리 밴드(Belly band) 체결에 따른 구조물 동특성을 분석하였다.

2. 발전기 고정자 권선의 구조

Fig.1은 화력발전소에 설치된 발전기의 전체구조를 나타낸다. 발전기는 회전자, 고정자, 여자기로 구분되며, 진동현상과 관련된 고정자는 7, 8, 9번 부품과 관련되어 있다.^{(3),(4)} 고정자 코어는 얇은 철판이 적층되는 구조이며, 키바(Key bar)에 의하여 길이 방

† 저자; 정회원, KEPCO KPS Technical Solution Center
E-mail : msyoo@kps.co.kr
Tel : +82-31-710-4395, Fax : +82-31-710-4557

* KEPCO KPS Technical Solution Center

향

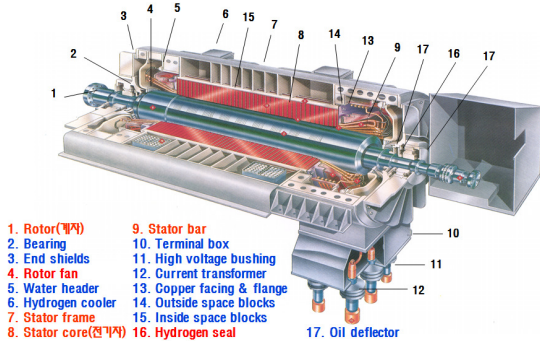


Fig.1 Structure of generator stator

으로 체결되어 조립된다. 본 논문에서는 고정자 코어(8번), 권선단부(9번)에서의 진동문제를 고찰하였다.

3. 소음발생 특성고찰

3.1 출력과 소음발생과의 관련성

발전기가 승속되어 정격속도인 3600rpm에 도달하게 되면, 로터에 전기가 가해지는 여자상태로 되면서 이때 전기적인 특성이 나타나게 된다. 또한 발전기에서 생산된 전기가 계통과 연계되어 계통병입 상태가 되어, 송전선로를 통하여 전기를 송출하게 된다. 따라서 발전기의 전기적인 문제점은 여자 상태에서 나타나기 시작하여, 출력이 증가되면 내부의 전기 에너지도 증가하면서 그 문제점도 같이 커지게 된다.

Fig.2는 100MW 이하에서 소음이 발생한 P1발전기(정격출력 180MW, G사)의 출력별 소음 레벨을 보여준다. 발전기 프레임의 중앙부(좌/우측)에서 측정된 소음값은 좌측 지점에서의 소음이 우측보다는 1dB 정도 높게 나타나며, 소음이 증가할 때는 그 좌 / 우측의 소음편차가 증가하였다. 특징적인 것은 계통병입 직후인 10MW에서의 소음이 98dB로 가장 크게 나타나고, 이후 출력이 증가하면서 소음이 감소하는 특성이 분명하게 관찰되었다.

Table 1은 50MW이하에서 소음문제가 발생한 P2발전기(정격출력 75MW, T사)의 출력변화에 따른 소음 발생여부(O, X)를 기록한 것으로, 75MW에서 출력을 감소시키면 50MW부근에서 소음이 급작스럽게 발생하는 현상을 보여준다. 이러한 소음은 Table 2와 같이 발전기 프레임에서의 진동과 동일한 경향

을 나타내며, 발전기를 길이 방향으로 중앙부 (B지

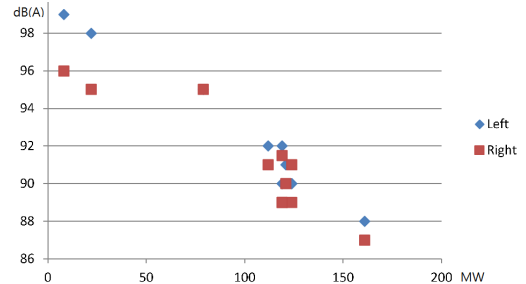


Fig.2 Sound level(dB,A) Vs Generator load(MW)

Table 1 Noise detecting during load down

TIME	Output [MW]	Exciter	Noise	Remarks
		O/X	O/X	
08:10	75.0	O	X	Normal sound (87dB)
08:38	75.0	O	X	Output began to reduce.
08:59	50.7	O	O	High level noise (94dB)
10:05	50.7	O	X	Noise disappear. Output increase at 10:28.
10:35	59.5	O	X	Output decrease at 10:38.
10:45	37.5	O	O	Re-occurrence of noise
12:42	0	X	X	No-load at 3600rpm
12:49	0	O	O	Excitation

Table 2 Vibration level during load down

Power [MW]	Exciter	Noise	Amplitude [mm/sp]			Remarks (Measured: ADRE)
	O/X	O/X	A	B	C	
50.7	O	O	9	8	9	High level noise
37	O	O	9	8	9	Noise re-occurs.
0	X	X	2	2	3	No-load at 3600rpm
0	O	O	5	4	5	Excitation

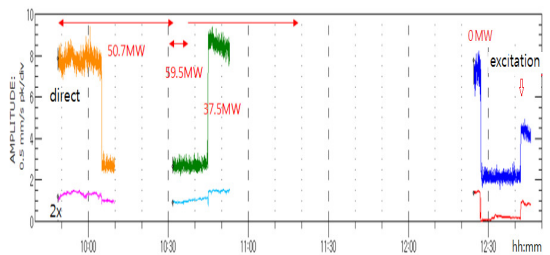


Fig.3 Vibration trend of generator frame

점을 포함하여 3등분한 위치에서의 Data이다. Fig.3은 50MW에서 발생한 소음이 1시간 경과후 해소되었다가, 출력이 감소함에 따라 다시 발생할 때의 발전기 프레임 진동변화를 나타낸 것이다.

Table 3과 Fig.4는 과도한 소음문제로 정상적인 운

전이 어려운 K발전기(정격출력 160MW, G사)의 소음/

Table 3 Noise and vibration level during load up

Items	Vibration value (mm/s p)				dB,A
	Left		Right		
	B	A	B	C	
Turning	-	-	-	-	84.3
No-load	0.9	0.7	1.1	0.9	91.4
Excitation	4.5	2.0	3.4	2.5	94.2
	5.3	2.9	5.1	3.5	
After load	5.8	3.1	10.1	4.0	98.1
20MW	5.6	3.1	9.7	4.7	98.7

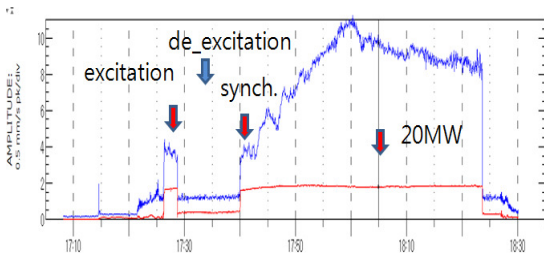


Fig.4 Vibration trend of generator frame

진동변화를 보여준다. 발전기에 여자전류를 인가하는 시점에 소음 및 발전기 프레임진동이 동시에 상승하였다. 출력이 증가함에 따라 소음이 상승한 후 다소 낮아졌으나, 소음/진동문제 20MW이상 운전하지 않았다.

또 다른 S발전기(정격출력 250MW, M사)의 경우 병입 시점에 소음이 발생한 후, 25MW 부근에서 해소되는 현상이 간헐적으로 발생하였다.

3.2 소음발생시 주파수 특성

발전기는 본질적으로 2×전원주파수(FL)인 120Hz의 전자기적 가진력을 가지므로, 고정자 코어에서 발생한 진동은 고정자 프레임에서 120Hz성분의 소음이 발생한다.

Fig.5는 앞서 언급된 P2발전기에서 소음이 발생할 때의 발전기 중앙부에서 취득된 소음주파수이며, A-웨이팅을 하지 않아 60/120Hz 주파수성분이 상대적으로 크게 나타난다. 정상상태인 Fig.6과 비교하면 120Hz의 조화성분이 분명하게 구분된다. Fig.7의 S발전기 소음측정 결과에서도 동일한 특성이 나타난다.

다만, 피크 레벨을 가지는 주파수대역은 발전기에 따라 다소 차이가 있으며, 소음발생시 소음레벨이 5dB이상 증가하였다.

Fig.8은 K발전기에서 소음이 발생할 때 발전기 프

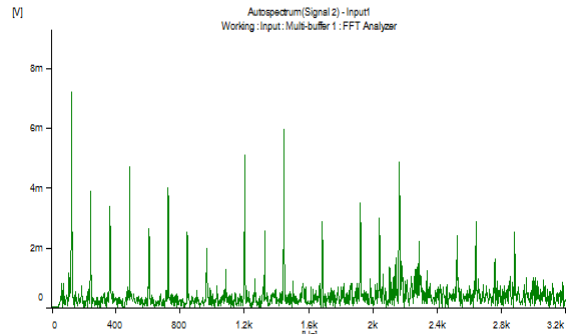


Fig.5 FFT plot at high level sound

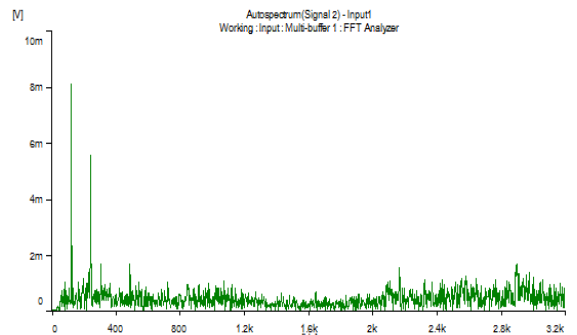


Fig.6 FFT plot at normal level sound

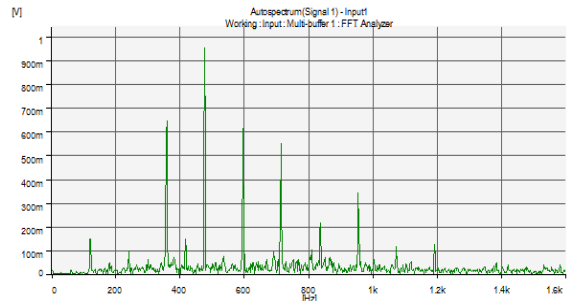


Fig.7 FFT plot of abnormal sound at initial load

래임에서 측정된 진동주파수이며, 6×2FL의 주파수 성분이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 정비작업 후인 Fig.9와 비교하면 120Hz의 조화성분이 확연히 구분된다. 이는 Fig.5 및 Fig.6의 소음주파수 특성과도 잘 일치함을 알 수 있으며, 다만 소음과 마찬가지로 최대 크기를 가지는 주파수대역은 측정 지점 및 설비 제작사/기종에 따라 Fig.8과는 다를 수 있다. 그러나 120Hz의 조화 성분의 증가는 분명하게 구분이 되는 특성이다.

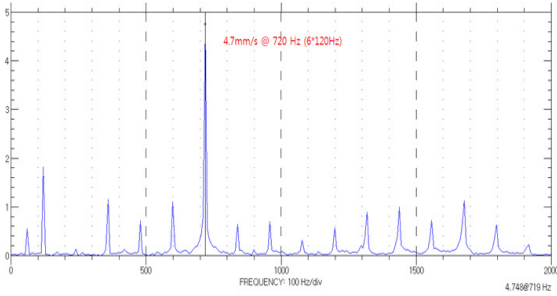


Fig.8 FFT plot at high vibration

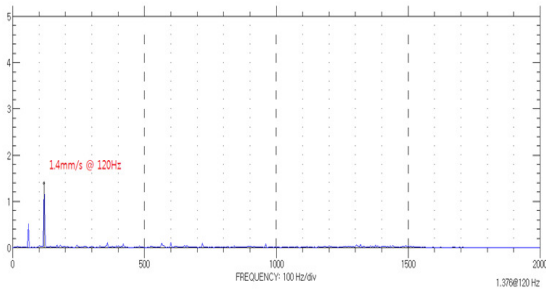


Fig.9 FFT plot at normal vibration after repair

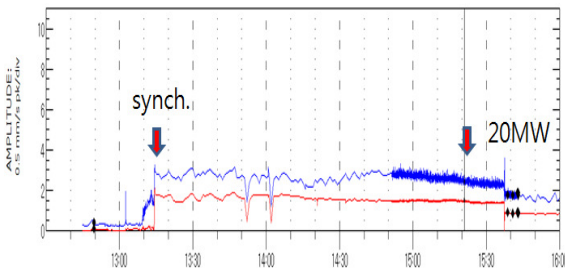


Fig.10 Vibration trend of generator frame after repair

3.3 소음 해소작업 후 결과

앞서 언급된 발전기 소음은 권선단부의 부분적인 바인딩 및 고정자 웨지의 교체(재조임)와 같은 작업을 통해 해소되기도 하나, 그러한 작업에 추가하여 벨리 밴드를 고정자 코어 외면에 체결하기도 한다.

Fig.10은 K발전기의 정비작업 후의 출력별 진동값으로 계통병입 시점에 2x 진동이 다소 상승한 이후, 출력증가에 따른 진동(물론 소음도) 변화가 크게 없음을 알 수 있다. 또한 Fig.9의 진동주파수에서 120Hz 조화성분은 거의 나타나지 않고 있다.

Table 4는 논문에서 언급된 발전기에서 소음이 발생하는 출력과 소음저감을 위하여 실시한 해결방안을 정리한 것이다.

Table 4 Noise characteristics and method of repair

Site	Noise	Method
P1	Low load	Belly band
P2	Half load	Replacement of wedge
K	Load	Belly band
S	Initial Load	Binding of end-winding

벨리 밴드가 체결되지 않았던 P2 및 S 발전기는 관련 작업 후 최초 운전 시에는 소음(진동)이 여전히 발생(정비 전보다 감소함)하였으나, 2~6개월 이후에는 소음현상이 완전히 해소되었다. 또한 벨리 밴드가 체결된 발전소에서도 소음발생 현상이 나타나는 것으로 보고되고 있으며⁽⁵⁾, 이는 밴드 반경방향의 체결력이 약해지거나 밴드 구조상 길이방향 헐거움은 크게 개선되지 않기 때문이다.

이러한 저부하 운전 상태에서 발생하는 소음현상은 고정자에서의 헐거움에 의하여 발생되고, 출력증가에 따라 고정자 온도가 상승하게 되면 이에 따른 고정자 코어에서의 열팽창으로 각 부품간 간극이 줄어들면서 헐거움이 해소되어 진동(소음)이 감소되기 때문이다.

4. 발전기 모달분석

발전기의 기계적인 진동특성을 진단하기 위하여 취약부위인 권선단부에 대하여서만 공진성 검사(개별 단부에 대한 주파수응답, 권선단부 조립체에 대한 모달 시험)를 실시하고 있으나, 코어에서도 모달 시험을 추가적으로 실시한 K발전기의 벨리 밴드 체결 사례를 통하여 그 특성을 분석하였다.

4.1 권선단부에서의 모달분석

발전기 권선단부는 고정자 코어 슬롯에 삽입된 권선이 코어 외부로 돌출되기 때문에 일종의 외팔보 형태의 구조를 가지게 되어, 진동에 취약할 수 있으므로 권선단부에 대한 공진시험을 실시하게 된다.

Table 5 및 Fig.11은 120Hz 주변에 고유주파수가 존재한 특정 권선단부를 바인딩하기 전/후의 결과이다. 바인딩 실시 후 문제가 되는 고유주파수가 7Hz 정도 상승하고, FRF 응답크기도 1/4로 현저히 감소된 것을 확인하였다. 이는 이때 바인딩을 실시한 또 다른 권선단부에서도 유사한 결과를 보여준다.

그러나 Fig.13의 각 모드에 해당되는 주파수 변화⁽⁶⁾는

Table 5 Frequency after binding of end-winding

Before	After
0.115m/s@ 61Hz	0.048m/s@ 64Hz
0.582m/s@ 81Hz	0.102m/s@ 83Hz
0.295m/s@120Hz	0.084m/s@127Hz

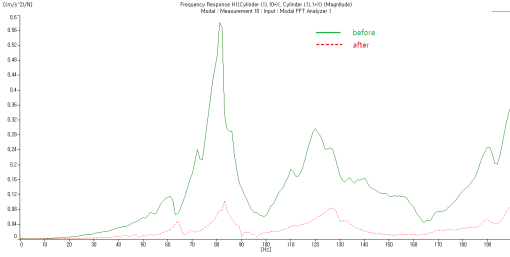


Fig.11 Comparison of frequency at end-winding

Table 6 Mode frequency (Hz) after binding at CE side

	Before		After	
	TE	CE	TE	CE
2 node	42.7	42.4	43.0	43.1
4 node	50.7	57.5	54.3	53.6
6 node	74.3	72.5	72.8	69.4
8 node	83.1	79.7	82.5	81.7

TE (Turbine End), CE (Collector End)

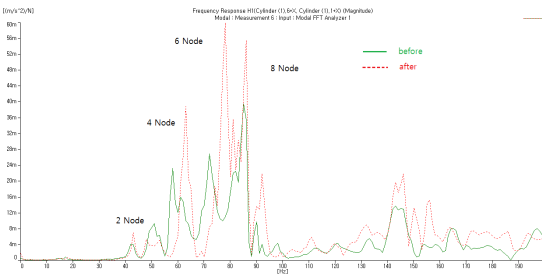


Fig.12 Comparison of frequency after binding at CE side

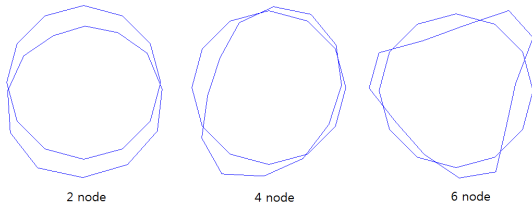


Fig.13 Modes shape of end-winding

크지 않았으며, 개별 권선만 바인딩한 다른 발전기에서도 동일하였다.

Table 6은 K발전기 권선단부에서의 각 모드별 주파수로, CE측(발전기 콜렉터) 단부에서만 바인딩을 4개소 실시한 결과를 정리하였다.

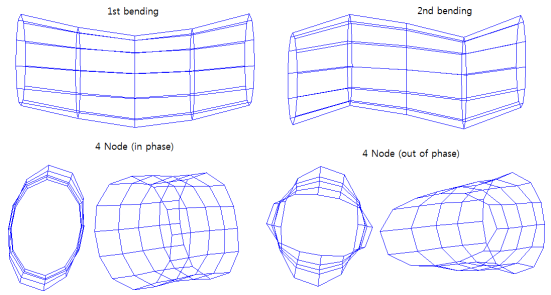


Fig.14 Modes shape of stator core

Table 7 Comparison of mode frequency (Hz) before repair

Hz	End-winding	Core
42.3	-	1st bending
42.7	2 node	-
57.0	4 node (2 lobe)	-
74.3	6 node	-
83.1	8 node	-
120.0	-	2nd bending
157.0	-	3rd bending

Table 8 Mode frequency (Hz) after repair (belly band)

	Before	After
1st bending	42.3	43.2
2nd bending	73.6	76.2
3rd bending	120.0	123.0

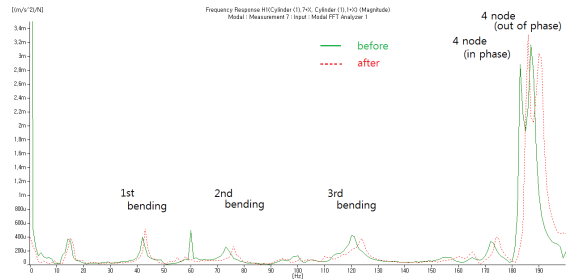


Fig.15 Comparison of frequency after belly band

4.2 발전기 코어에서의 모달분석

발전기 코어내면 길이방향 5지점을 포함한 발전기 코어 전체의 모달시험에서는 권선단부의 링(Ring) 형태보다는 원통 길이방향의 굽힘(bending)형태의 진동 모드가 분명하게 나타난다. Fig.14는 발전기 코어의 진동모드를 보여주며, 굽힘모드 이후 190Hz부근에서 코어 전체가 링 형태로 진동하는 모드가 확인된다.

Table 7은 권선단부 및 코어에서의 모드 주파수이며, 권선단부에서 나타난 저차수의 2 node 모드는

코어의 1차 굽힘모드와 일치함을 알 수 있다.

Fig.15는 발전기 코어에 벨리 밴드를 체결하기 전/후의 주파수변화를 나타내며, 진폭변화는 미미하나 Table 8과 같이 고유주파수가 3Hz 정도 증가하였다. 이러한 증가는 벨리 밴드 체결에 의한 것으로 반경방향 강성증가에 효과가 있는 것으로 확인된다.

개별적인 권선단부에서 측정된 FRF 측정 data에서 나타난 120Hz 고유주파수는 코어의 반경방향 굽힘모드와 관련성이 있는 것으로 판단되며, 진폭이 크게 나타난 190Hz 대역의 링 모드(4 node)는 120 Hz 주파수대역과 이격되어 진동발생 가능성은 거의 없는 것으로 판단된다. 보다 많은 실험적인 자료가 축적되어야만 하나, 권선단부와 코어의 모드는 서로 독립적인 것으로 보는 것이 타당한 것으로 분석된다.

5. 결 론

본 논문에서는 발전기의 전자기적 소음이 발생할 때, 현장 특성 및 주파수 분석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 발전기의 전자기적 이음은 여자 및 계통 병입시 발생하기 시작하여, 저 부하에서 최대값을 가지다가 고 부하시 급격히 감소 또는 지속적으로 감소되는 경향을 확인하였다.

(2) 소음발생은 발전기 프레임에서의 진동에 의한 구조기인 소음(Structure-borne noise)이며, 발전기 고정자(코어)에서의 이완에 의하여 발생하는 것을 확인하였다.

(3) 발생되는 주파수 특성은 120Hz 및 이의 조화 성분을 통하여 전자기적인 소음임을 인지할 수 있으며, 결과적으로 고조파 특성인 쩡~하는 전자기음을 확인할 수 있었다.

(4) 권선단부의 개별 권선에 대한 바인딩 시 고유주파수가 5Hz 이상 증가하고, 응답은 현저히 낮아지는 경향을 확인하였다.

(5) 권선단부에서의 부분적인 바인딩작업시 모드 주파수 및 진폭의 변화는 크게 발생하지 않았다.

(6) 권선단부에서는 광심영역 주파수(200Hz이하)에서 링 모드가 지배적이며, 코어에서는 굽힘모드가 지배적으로 나타나는 경향을 확인하였다.

(7) 코어 외면에 벨리 밴드를 체결함으로써, 각 모드

의 주파수는 3Hz 정도 상승하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) C. H. Kim, 2003, Vibration Analysis of the End-winding of Large Generator for Fossil Power Plant under Electromagnetic Excitation, Proceeding of KSNVE Annual Autumn Conference pp. 350~355.

(2) H. S. Kim, 2006, A Study on the change of Dynamic Characteristics of Stator Windings due to Generator Operation, Proceeding of KSNVE Annual Spring Conference.

(3) G. Klemper and I. Kerszenbaum H. Yang, 2008, Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, IEEE Press John Wiley & Sons, Inc., Publication, pp.411~535.

(4) ANSI/IEEE Std 67, 1972, IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators, Items 8.6.2. pp.34.

(5) K. H. Yang, 2012, Investigation on Characteristics of Abnormal Sound from the Generator in a Combined Cycle Power Plant, Proceeding of KSNVE Annual Autumn Conference pp.248~249.

(6) Vibrant Technology, 2012, MEscope VES Reference Manual Vol. IIA - Basic Operation, pp.79~102.