

# 축(軸) 전압의 발생원인 및 대책과 측정방법



한전전력연구원  
수화력발전연구소  
수석연구원/공학박사 임익현  
Tel : (042)865-5640

## 1. 머리말

회전 전기기기에 발생하는 축전압 및 축전류 현상에 대해서는 이미 잘 알려져 있다. 그러나 이의 대응책을 실행하는 현장에서 느끼는 감도의 깊이는 다른 것 같다. 회전 전기기기에 큰 작든 축전압이 발생하고 또한 그 원인도 다양하다. 축전압의 발생이 현저할 경우에는 베어링 및 축 밀봉장치 부근을 통하여 축전류가 흐르고 이에 따라서 베어링의 마모, 축의 손상, 윤활유의 흑화 같은 현상이 초래하고 경우에 따라서는 베어링의 손상까지 발전하는 경우가 있다. 그러므로 이와 같은 장애가 생기지 않게 사전에 회전 전기기기에 축전압의 발생 기구에 따라서 축전류의 방지대책이 취해지고 있다. 일반적으로는 베어링 하부 지지대 부분을 절연함으로써 방지하거나, 브러시를 이용해서 축을 직접 저항 접지시키거나 수동형 저항-커패시터 필터를 축과 대지 간에 설치해서 이를 브러시로 축을 접지시키는 조치를 취하지만 기계의 구조상 베어링부의 절연이 안 되거나 상기의 조치가 어려운 경우도 있다. 이와 같은 경우에는 축전압의 발생을 극력 적게 하는 설계, 제작상 충분한 고려가 되어 있어야 한다. 여기에서는 일반적인 회전기에서 발생하는 축전압에 대해서 그 발생원인, 현장에 있어서의 축전압의 측정방법 및 측정결과를 간단히 살펴보고, 특별히 정지형 여자시스템(싸이리스터 직접여자형 여자시스템이라고도 함)을 채용하고 있는 동기기에서의 축전류 방지 대책을 살펴보고자 한다.

## 2. 축전압의 발생원인과 방지대책

축전압이란 회전 전기 기계의 축 양단 사이 혹은 축과 베어링의 사이에 발생하는 전압을 말하며 그 발생을 원인별로 나누면 [표 1]에 나타난 것 같이 분류할 수 있다. 표1에는 축전압의 발생원인, 전압이 발생하는 개소, 전압의 종류 및 각각의 원인에 의한 축전압에 대한 대책도 병기되어 있다. [표 1]에 나타내듯이 원인에 따라서 대책도 서로 상이하다.

### (1) 자기 불평형에 기인한 축전압

자기 불평형에 의해서 생기는 축전압은 다른 것보다 가장 중요한 것이며 일반적으로 축전압에 의한 베어링 사고의 대부분이 이에 의한 것이다. 자기 불평형에 의한 축전압은 전기자 철심의 원주 방향에 대한 자기 저항이 불평형이 되면 축과 쇄교하는 교번자계가 발생하고, 이에 의해서 축 양단에 교류전압이 유기되는 현상이다.

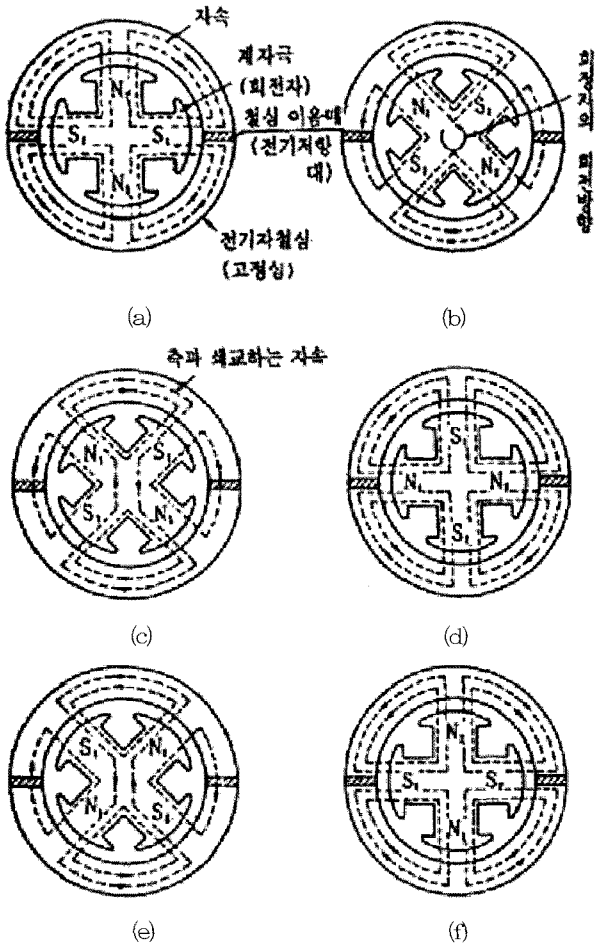
발전용 동기기에서 이 같은 자기 불평형이 발생하는 주요 원인에는

- (i) 고정자 철심과 회전자와의 편심에 의한 불평형
- (ii) 고정자 철심의 완전한 동근 원이 아닌 타원형으로 인한 왜곡에 의한 불평형

등이 있다. 그러므로 자기 불평형에 의한 축전압에는 때로는 여러 요인이 중첩하여 복잡한 전압 파형으로 되고 또한 전압의 값을 예측하는 것도 힘든 일이다. 기본적인 분할 고정자의 철심 이음매의 자기 불평형에 의한 축전압에 대하여 고찰해보면 4극으로 철심 이음매가 2개소가 있는 경우인데 [그림 1]에서와 같이 a, d, f에서는 축과 쇄교하는 자속이 대칭일 때이고, b, c, e에서는 비대칭이다. 축과 쇄교하는 자속은 회전자가 90도 이동할 때마다 방향이 반전하는 교번자속으로 된다. 축에는 이 교번자속의 변화를 방해하는 방향으로 전압이 유기된다. 또한 교번자속은 회전자가 1회 회전에 2주기의 비율로 발생한다. 동기기의 경우 4극기의 1초간의 회전수는 전원 주파수의 2분의 1이기 때문에 이 유기전압의 주파수는 전원 주파수라는 것을 알 수 있다.

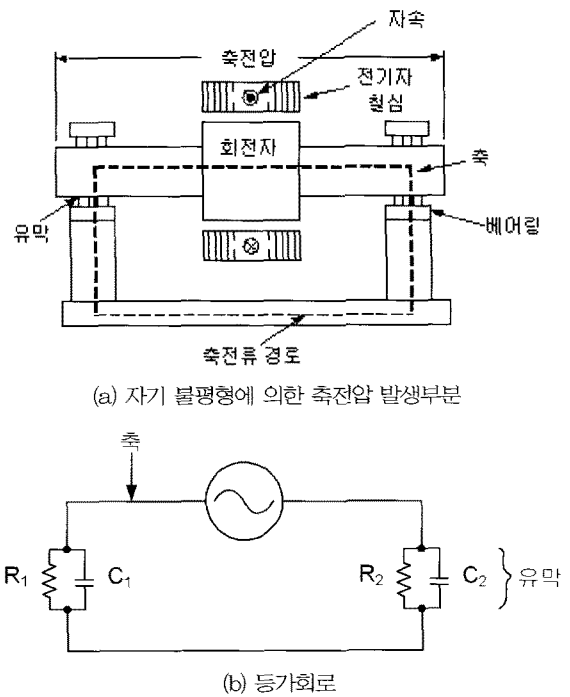
[표 1] 축전압 분류표

형태 구분	원 인	전압발생 부위	전류의 종류	대 책
A	축에 전압이 직접 인가	축과 각 축수 사이	AC 또는 DC	1) 각 축수를 절연 2) 축을 접지
B	전자유도에 의해 축에 기전력이 발생한 경우	1) 축의 양단 사이 2) 축과 각 축수 사이	AC	1) 1축수를 절연(단, 그 축수보다 앞에 다른 축수가 더 있으면 그 전부를 절연) 2) 축의 양단을 접지
C	축에 자속이 있는 경우	1) 각 축수의 양쪽 끝단에 있는 저널부분 사이 2) 각 축수의 단보와 이에 대응하는 저널부분의 사이	AC 또는 DC (자속 종류)	1) 보상권선을 부가하여 암페어턴의 불평형을 없앴. 2) 축수지지부위에 비자성의 재료를 넣어서 자로의 리액턴스를 증대 3) 각 저널의 양쪽 단부를 접지
D	정전하에 의한 경우 1) 미립자가 충돌하여 이온화 되는 경우 2) 하전된 윤활유가 공급된 경우	축과 각 축수 사이	DC	1) 각 축수를 고전압에 대한 절연처리 2) 축을 접지
E	정지형 여자시스템의 사이리스터의 전류(轉流) Commutation)로 인해 발생 되는 계자회로의 고주파 노이즈	1) 축의 양단 사이 (저주파수에서는 60V, 고주파수에서는 대략 30V의 축전압이 추가로 발생)	AC	1) 한쪽 축수를 절연(단, 그 축수보다 앞에 다른 축수가 더 있으면 그 전부를 절연) 2) 계자회로에 저항-콘덴서 필터를 설치 3) 발전기 축 종단에 저항-콘덴서 회로를 접지

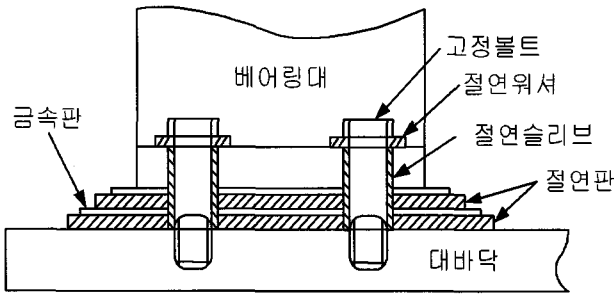


[그림 1] 자기 불평형이 생기는 이유

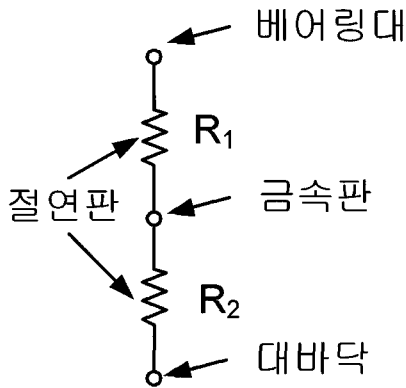
[그림 2]는 자기 불평형으로 인한 축전압의 발생부분과 경로, 그리고 등가회로를 나타낸다. 이 경우의 축전류 방지대책은 축전류 경로에 절연물을 삽입함으로써 해결한다. [그림 4]에 베어링 지지대와 바닥과의 사이에 부착된 절연판의 한 예를 나타낸다. 최근의 것은 같은 그림 (b)에 나타내듯이 2장의 절연판 사이에 금속판이



[그림 2] 자기 불평형에 의한 축전압 발생부분 및 등가 전기회로



(a) 축전류 방지 절연 설치 사례의 단면



(b)의 등가회로

[그림 3] 축전류 방지 절연판 설치 모습 및 등가회로

삽입된 방식이 취해지고 있다. 이 방식이면 기계를 분해하지 않아도 금속판의 절연저항을 측정하면 축절연이 양부를 판정할 수가 있다.

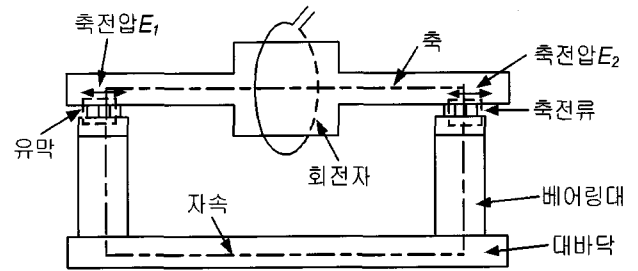
## (2) 단극작용에 기인하는 축전압

[그림4(a)]와 같이 축을 둘러싼 불평형 암페어·턴이 존재하는 경우에는 축이 자화되어 축에서 베어링을 통하여 누설 자기회로가 형성 된다. 이에 따라서 축의 저널 부분에 기전력이 발생하고 축전류가 흐른다. [그림 4(b)]는 이 경우의 등가회로이다. 방지 대책은 불평형 암페어·턴을 평형시키거나 자로에 비자성체를 넣어서 자로의 리액턴스를 증가시키는 일이다.

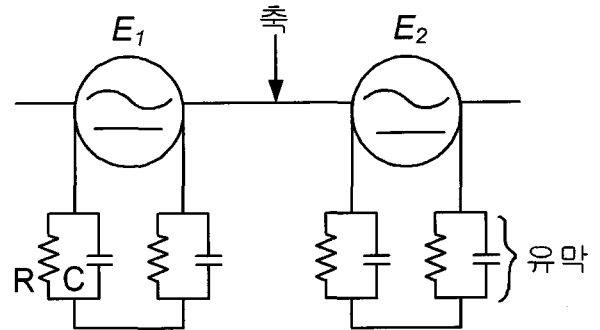
최근에는 회전자 권선의 감는 방식, 고정자 권선 끝부분의 접속처리 등에 충분히 주의하고 있기 때문에 정상운전의 상태에서는 이것으로 인한 축전압 발생은 거의 없다.

## (3) 정전하에 기인하는 축전압

유막에서의 마찰에 의한 정전기나, 이상기체에 가까운 고압에 증기가 터빈 날개와 충돌할 때 중성의 증기가 이온화하고 정전하와 음전하를 띤 입자로 갈라질 때에도 대전한다.



(a) 단극작용에 의한 축전압의 발생 경로



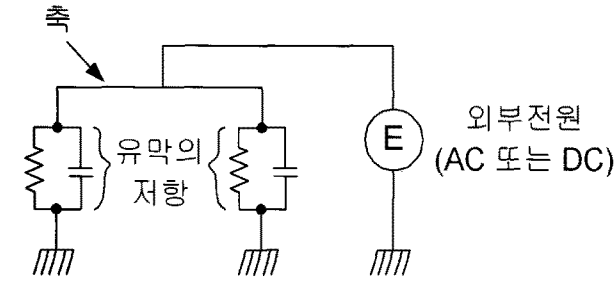
(b) 등가회로

[그림 4] 단극작용에 의한 축전압의 발생부분 및 등가회로

유막의 절연이 정상이면 축에 정전하가 축적되어 전위는 상승한다. 축이 베어링 부분에 직접 접촉하거나 유막의 절연이 파괴됨으로써 방전한다. 정전하의 축적 원인이 일시적인 것이 아닌 경우에는 이 경우의 축전압은 펄스 모양의 전압으로 된다. 대책으로서는 축을 접지면 된다. 회전 전기기계에서는 이런 종류의 축전압 발생은 극히 적기 때문에 특히 문제는 되지 않는다. 그러나 증기 터빈 등 정전하 축적이 생기기 쉬운 것과 직결되는 동기기는 충분히 주의를 기울일 필요가 있다. 증기터빈의 경우에 축전위가 100V를 넘은 사례가 있다고 보고 되고 있다.

## (4) 외부전원의 직접 인가에 기인하는 축전압

이것은 회전자 권선과 회전자 철심과의 접촉에 의한 것이다. 이 때의 축전압은 회전자 권선의 전원의 종류, 전원 전압의 크기, 권선의 권회수 및 권선의 접촉 위치에 따라서 그 크기가 결정된다. 수소 냉각이 아닌 직접 공기 냉각 방식의 일부 가스터빈 발전기에서 오염된 냉각공기와 잦은 기동정지로 인한 전기자기적 충격으로 회전자내에 권선과 절연물의 변형이 발생되고, 이 현상의 지속으로 절연이 파괴된다. 권선과 회전자 본체가 단락되지 않도록 특별한 주의를 기울일 필요가 있다. 그 등가회로를 [그림 5]에 나타낸다.



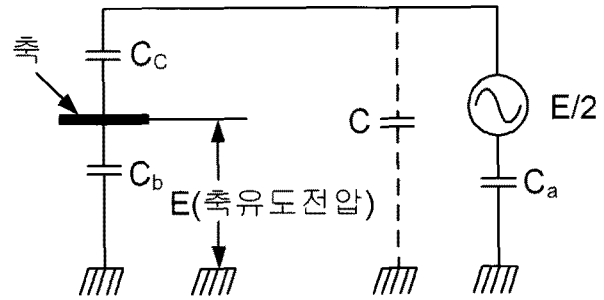
[그림 5] 외부전원의 직접 인가원인에 의한 축전압 발생 등가회로

### (5) 사이리스터 정류기 전류(轉流)현상으로 인한 축전압 발생

실리콘 정류기나 사이리스터를 구동 전원으로 한 직류전동기 또는 직접 여자방식을 채용하고 있는 동기기 등에서 축과 베어링 간에 전압이 유도된다. 이것은 정류기에 의해서 정류된 직류전압 속에 포함되어 있는 교류성분의 전압(E)이 직류기의 전기자 권선 혹은 동기기의 계자권선과 회전자 철심 간의 정전용량( $C_c$ ), 축과 베어링 간의 유막의 정전용량( $C_b$ ), 전원축의 대지 정전용량( $C_a$ )에 의해서 분압되어 축에 대지전위(커먼모드 전압)가 발생하는 것이다.

이 현상에 의한 축에 유도 전압에서는 수 10V에 달하는 경우도 있다. 통상 축전압이라고 말하는 자기 불평형으로 인해서 발생된 축전압은 크기가 수 V인데 비하여 여기서 발생하는 축전압은 큰 수치이다. 그런데 전류 용량은 수 mA 정도이다. 그러나 전류는 작지만 이 전압이 20V 이상으로 반복횟수가 많아지면 부식이 점진적으로 진행된다. 일부에서는 이 현상으로 인한 축전압 문제가 중요하지 않다고 보고된 경우도 있지만 또 다른 논문 등에서는 이로 인한 베어링의 손상이 주류를 이룬다고 보고 되고 있다. [그림 6]에 이 경우의 등가회로를 나타낸다. 이 현상은 사이리스터가 전류(轉流 : Commutation)하는 과정에서 급준한 피크성 계단 구형파가 기본 주파수의 3배 주파수로 발생하고, 이 전압이 계자회로의 커먼모드 전압을 증가시키면서 축전압도 함께 증가시키는 것으로 되어있다. 이 축전압을 방지하는 대책으로서는 동기기 또는 직류기의 계자회로 상에 수동형 R-C 필터를 취부하고, 터빈 쪽의 반대편인 발전기 쪽(브러시가 있는 쪽)에 축과 대지간에 브러시를 통해서 수동형 R-C 회로를 두는 것이다. 저항값은 470 Ohm이고 축전기 용량은  $10\mu F$  정도이다. 또한 정류기 입력단에 있

는 여자변압기의 대지 정전용량을 최소화하는 방안을 설계 또는 시공 시점에서 강구해야 한다. 즉 정류기 입력단에는 대지간에 C와 같은 커패시터를 두면 안 된다는 것이다.



[그림 6] 사이리스터 정류기 전류(轉流)현상으로 인한 축전압 발생 등가회로

### 3. 축전압으로 인한 악영향

축과 베어링 사이에는 윤활 유막이 만들어져 있는데 베어링의 구조가 적당하고 또 베어링 부하가 안정된 경우에는 유막도 안정되어 작은 축전압에 대하여는 절연성을 유지하고 있다. 그렇지만 앞에 기술한 조건이 충족되지 않았을 때나 축전압의 수치가 큰 경우에는 유막을 통하여 방전이 일어나거나, 축과 베어링 금속간에 접촉하는 개소로 전류가 통과한다. 즉, 축전류가 흐른다. 이 경우의 축전류는 국부적으로 집중하여 흐르기 때문에 그 부분은 고온으로 되고 베어링 메탈에 국부적 용융이 생긴다. 녹은 부분은 유막의 압력으로 휘날려서 메탈 표면에 작은 흠집이 생긴다. 이것은 피팅(pitting)이라고 불리는 현상이다. 한편 축도 아크로 침해되어 표면이 거칠어지는데 축재의 정도 및 기계적 강도가 크기 때문에 메탈처럼 흠집은 안 되고 스코어링(scoring)이라고 불리는 달라붙은 것 같은 손상이 생긴다. 또한 윤활유도 아크 때문에 카본의 석출이 일어나 흑화 한다. 이와 같은 상태가 계속하면 윤활특성이 저하하고 기계적인 마모도 증대되고, 따라서 손상이 중대하고 드디어는 운전 불능에 이른다.

앞에 기술한 베어링 및 축 밀봉장치에 미치는 축전압으로 인한 손상문제는 베어링의 상태, 유막의 두께 등에 복잡하게 영향을 끼치기 때문에 손상을 일으키는 축전압 및 축전류의 크기를 정량적인 값으로의 결정은 힘든 문제이지만 일반적으로는 미끄럼 베어링에 대해서는 [표 2] 및 [표 3]에 나타내는 것이 있다. 여기서 반드시 중요한 것은 대용량 터빈발전기에서는 축전압을 반드시

20V 이하로 유지해야 한다는 것이다. 기름 베어링에 대해서는 미끄럼 베어링에 비하여 유막 혹은 그리스막이 얇기 때문에 축전압에 대하여 다소 민감해지지만 실험에 의하면 [표 2]와 거의 같다. [표 4]에 축전류 한계값을 나타낸다. 이 경우, 전류밀도에 사용되는 면적으로서는 볼 혹은 물리의 수압면적을 채택한다. 그러므로 대책으로는 축전압이 실효값에서 0.5V를 넘은 기계에 대해서는 [표 1]에 나타내는 여러 가지 대책을 세울 필요가 있다.

**[표 2] 미끄럼 베어링에 대한 축 전압의 한계값**  
(축전류 방지 절연이 없는 경우)

축 전압의 실효값[V]	경향
< 0.5	무해
0.5 ~ 1.0	유해한 축전류가 흐를 가능성이 있다.
> 1.0	1주간에서 1년 정도로 베어링이 손상한다.

**[표 3] 미끄럼 베어링에 대한 축 전류의 한계값**  
(베어링 규격에 무관)

축 전류의 실효값[V]	경향
< 10	무해
< 40	경험상 1년 정도는 운전가능
> 100	위험하다

**[표 4] 기름베어링에 대한 축 전류의 한계값**

전류밀도(실효값) [A/mm <sup>2</sup> ]	경향
< 1	무해
> 1.4	약 500시간 운전 후에 손상이 일어날 수 있다.
> 2	5시간 운전 후에는 손상이 나타난다.

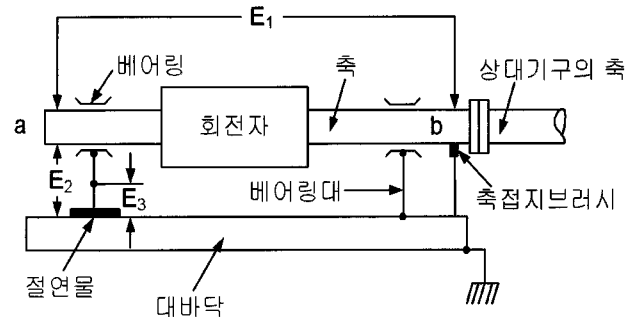
#### 4. 축전압 측정방법

축전압의 측정에 있어서는 축전압의 발생 원인이나 발생하는 개소는 물론이지만 그 기계가 축전류에 대해서 어떤 방지대책이 취해져 있는가 등, 기계의 구조에 대해서 잘 알고 있지 않으면 안 된다. [그림 7] 및 [그림 8]에 일반적인 수평축 기계와 수직축 기계의 구조 및 축전압의 발생부위를 나타낸다.

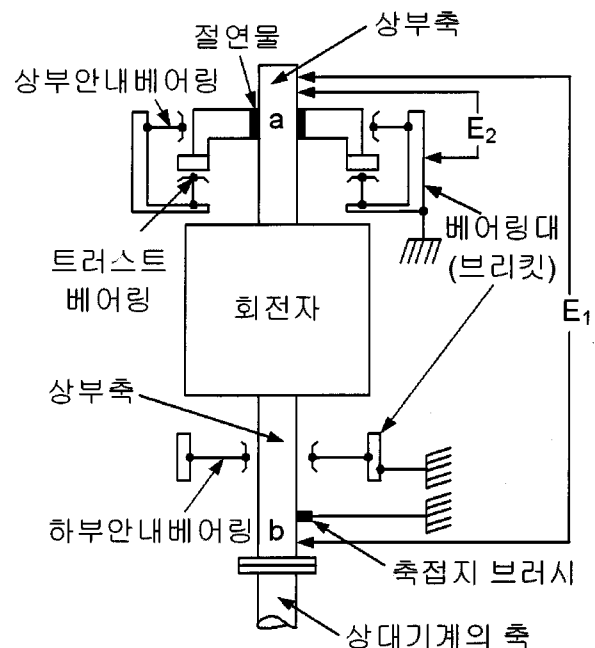
##### (1) 축전압 측정 지점

[그림 7] 및 [그림 8]과 같이 축전압 측정에는 축의 양단 간 즉, E1의 전압을, 축전위의 측정에는 E2의 전압을, 또 축전류 방지 절연의 좋고 나쁜 판정에는 E3의 전압을 각각 측정하면 된다. 축접지 브러시 대신에 저속

기에는 미끄럼식의 기름 막기가 사용되거나 축전위의 발생이 매우 작은 기계에서는 처음부터 축접지 브러시의 부착이 안 된 것이 있다. 이 경우, E1의 전압을 측정할 경우에는 같은 [그림 7]의 축의 b 지점을 접지한다.



**[그림 7] 수평축기의 축전압 발생부위**



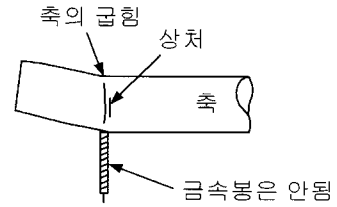
**[그림 8] 직축형 발전기의 축전압 발생 부위**

##### (2) 축전압 측정 방법

축전압의 값은 대용량 터빈 발전기나 수차발전기 등에서는 10V를 넘는 경우도 있지만 일반적으로는 5V 이하의 전압이며 소형기에서는 1V이하이다. 그러므로 사용하는 전압계는 내부 임피던스가 높은 것을 사용하고, 또 교류 및 직류 성분을 동시에 파형으로 측정할 수 있는 오실로스코프가 좋다. 오실로스코프는 전압 파형을 관측할 수 있기 때문에 축전압의 발생원인을 찾는 데 가장 알맞은 측정기이다. 이러한 측정기를 사용하여 미소전압을 측정하는 경우에는 측정 리드선에 실드선이나 꼬임선을 사용하여 실드 또는 꼬임선의 1선을 접

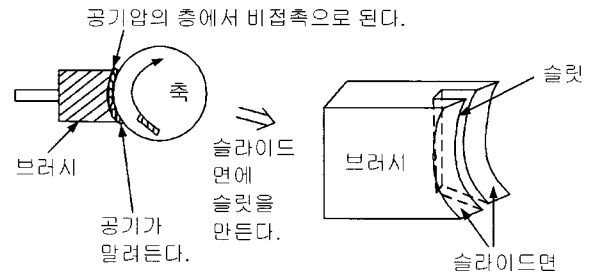
지하여 유도전압을 방지할 필요가 있다. 측정 대상물은 회전하고 있는 축이기 때문에 안전하고 또한 정확하게 측정하기 위해서 접촉자에는 흑연 브러시 혹은 금속 흑연 브러시를 사용한다. 동 막대기나 다른 금속을 사용하면 접촉 불량으로 인해서 정확한 전압(실제의 전압보다 낮아진다)을 측정할 수 없다. 또한 강하게 축에 접촉 시키기 때문에 특히 고속기에 있어서는 축의 국부 가열을 초래하여 축에 흠집을 일으키는 경우도 있다. 한편 축의 표면에 녹이 발생한다든지 오일이나 먼지가 붙어 있으면 마찬가지로 정확한 전압측정을 할 수 없다. 축의 측정 위치는 되도록 원주 속도가 낮은 곳이 접촉이 좋아지기 때문에 축 단면의 중심이나 축의 가느다란 부분을 선택한다. 또한 원주 속도가 높으면 브러시와 축의 사이에 공기층이 생겨서 잘 접촉할 수 없게 되기 때문에 브러시의 슬라이드 면에 슬릿을 넣으면 좋다.

이상을 정리하여 그림으로 나타내면, [그림 9]의 (a), (b), (c)와 같이 된다.



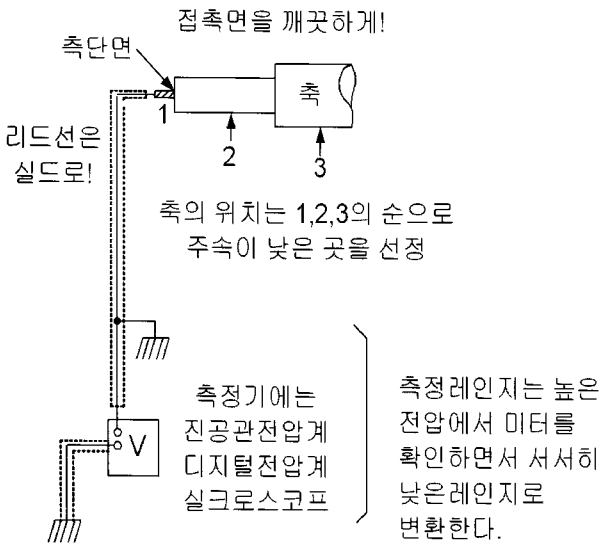
접촉자에는 브러시를 사용한다. 단 금속을 사용하면 상처를 주든지 국부가열에 의해 굽힘이 발생한다.

(b)



(c)

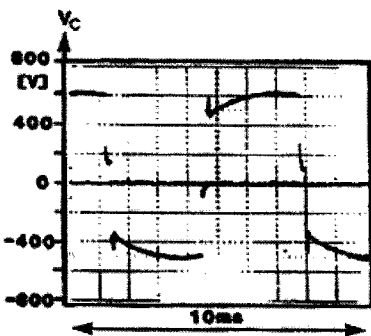
[그림 9] 축전압의 구체적인 측정법



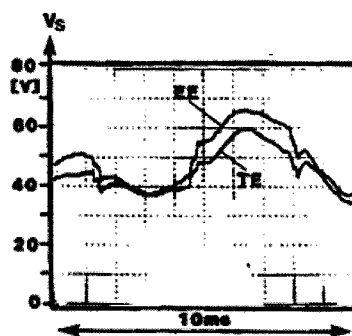
(a)

### (3) 축전압 측정 때의 주의

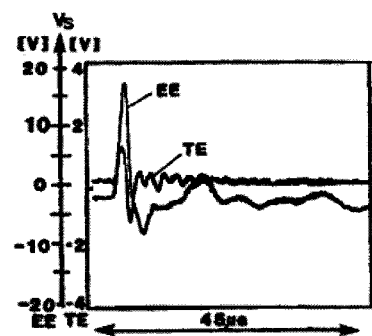
- (i) 회전하고 있는 축에 접근하기 위해 안전에 주의한다.
- (ii) 축접지 브러시 등의 부착이 안 된 기계인 경우, 절연되어 있는 베어링에 직접 접촉하는 것은 극력 피할 것, 2.(3) 및 2.(4)의 원인에서 축전위가 상승하고 있는 경우도 있을 수 있기 때문이다.
- (iii) 잘못하여서 절연되어 있는 베어링을 접지하는 일이 있어서는 안 된다. 접지를 하면 접지 지점과 다른 인접 베어링을 통하여 축전류가 흘러서 인접 베어링을 손상시키기 때문이다. 특히 대상 기계가 내연기관일 때는 충분한 주의가 필요하다.



a) 커먼모드 전압



b) 비접지 상태 축전압



c) 접지 브러시가 있을 때의 축전압

[그림 10] 1200MVA 터빈 발전기 축전압 측정파형 (TE : Turbine End, EE : Exciter End)

## 5. 결론

여기에서는 회전 전기기계가 정상적으로 운전되고 있는 경우에 발생하는 여러 가지 축전압에 대하여 그 발생기구, 기인하는 장애, 방지방법, 허용값, 측정법 및 결과의 검토에 대해서 기술하였다.

특히 정지형 여자시스템으로 인한 축전압 형태는 고주파수 전압피크 값을 갖는 기본주파수의 3배의 구형파이고, 이러한 전압이 발생하는 원인은 정류기의 커먼모드 전압이었고, 그리고 사이리스터의 전류기간 중에 발생한 가파른 전압상승 현상으로 인함이었다. 기존의 터빈 종단에 설치되어 있는 접지 브러시의 경우는 그 기능이 정상적으로 잘 동작하더라도 축전압의 피크치를 모두 제거할 수 없으므로 축과 대지간의 정전용량이 커다란 영향을 끼침으로 인해서 축과 대지 간에  $10\mu\text{F}$  커패시터를 설치하면 정지형 여자시스템으로 인해서 발생하는 축전압을 크게 줄일 수 있는 최상의 방법이라는 것을 제시 하였다.

20V 이상의 축전압이 베어링과 축 밀봉장치의 전기부식의 주요 원인이 될 수 있다는 것을 제시하였는데, 지면상의 한계로 이에 대한 실험장치와 그 실험절차를 보여 주지 못했다. 대용량 터빈 발전기 시스템의 정지형

여자시스템에서에서 발생하는 모든 형태의 축전압으로부터 시스템을 보호하기 위한 대응책으로는 발전기의 여자기 종단에 수동형 RC회로를 브러시를 통해서 접지시키는 것이다.

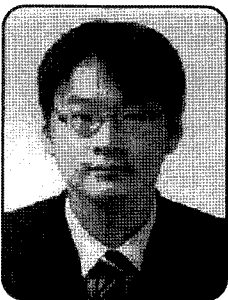
이 방식은 저비용으로 유지보수를 할 수 있고 브러시 수명도 길다. 이 방식을 쓰면 기존의 접지 브러시의 운전 유무에 관계없이 축전압을 낮출 수 있고 시스템 감시가 용이하다.

이 글이 축전기로 인한 회전 전기기계 베어링 및 축 밀봉장치의 손상 방지에 도움이 되었으면 한다.

## 참고문헌

1. 1997년 3월호 월간전기 잡지(94쪽-101쪽)의 “축(軸) 전압의 능숙한 측정방법”
2. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 2, June 1988 Page 409-419, “SHAFT VOLTAGES IN GENERATORS WITH STATIC EXCITATION SYSTEMS-PROBLEMS AND SOLUTION”
3. 동경전기대학 출판국 발행 1977년 발행 “동기기”

# 발전정보 관리 시스템(Power Generation Information Manager)



ABB코리아(주)  
엔지니어 김정훈  
Tel : (041)529-2285

## ■ 소개

발전 사업소에서 가장 중요한 부분은 발전 과정에서 의 성능 최적화에 있습니다. 이것은 현재의 발전 사업에 대한 자원을 적절하게 활용 및 분배, 운영, 경비절감 부분에 가장 큰 부분을 차지하고 있습니다. 또한 고장원인을 분석 및 예측하여 발전사업 경영 효율을 고려하는 부분도 있을 것입니다. 앞으로도 성능 최적화에 초점을 두고 비용절감 및 운영 효율에 대한 관심과 노력이 접