

## 돌극 동기발전기의 역기전력 고조파 연구

박정태, 김창욱, 김근웅  
현대중공업(주) 기전연구소 전력기기연구실

### A Study on the EMF harmonics of Salient Synchronous Generator

Jeong-Tae Park, Chang-Wook Kim, Keun-Ung Kim  
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

**Abstract** - In this paper, air gap flux density is calculated by permeance model which can consider the effects of the stator slot and the salient pole shape of the salient synchronous generator. No load Electro-motive force (EMF) of the short-pitched and distributed stator winding is also calculated. Therefore, it's very convenient to calculate the THD of the no load EMF for the user's request, in the first design state.

### 1. 서 론

동기발전기에서 전압 파형은 정현파이어야 하나 돌극 형상 및 고정자 슬롯에 의한 공극 퍼미언스가 존재하기 때문에 기본파 EMF (Electro-Motive Force)에 많은 고조파가 함유되며, 따라서 주변기기에 대한 고조파 영향 [1]의 규제 때문에 발전기의 EMF 고조파에 대한 정확한 계산이 필요하다.

공극 자속을 구하는 방법은 퍼미언스법과 Finite Element Method (FEM)이 있다. 퍼미언스법은 물리적 현상을 기본으로 해서 자속밀도를 구하고 자속밀도의 생성원리를 파악함으로써 현상의 정성적 이해가 쉬우며, 계산 시간이 다소 적게 걸리는 장점이 있다.

한편 FEM은 퍼미언스법에 비해 보다 정확하게 공극 자속밀도를 구할 수는 있으나, 계산시간이 오래 걸리며, 따라서, 동기기의 초기설계 단계에서 FEM을 적용하기에는 실용성에 문제가 있을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 퍼미언스법을 사용하여 빠른 속도로 공극 자속밀도 분포를 구하고 또한 고정자 권선의 단절권 및 분포권에 대응하여 역기전력을 계산한다. 아울러 계산된 역기전력(electro motive force, EMF)의 Total Harmonic Distortion (THD)를 계산한다.

### 2. 퍼미언스법에 의한 공극자속밀도 및 THD 계산

공극 자속밀도는 공극 퍼미언스와 MMF 와의 곱으로 표현할 수 있다. 먼저 공극 퍼미언스를 구한 다음 회전자의 MMF를 구하고 그 결과를 곱하여 공극 자속밀도를 구한다.

#### 2.1 공극 퍼미언스 계산

돌극기의 공극 퍼미언스는 회전자의 돌극 형상에 의한 돌극 퍼미언스와 고정자 슬롯에 의한 고정자 슬롯 퍼미언스가 중요하다. 보통 돌극 회전자에 설치되는 제동바의 영향은 제동바의 슬롯 개구가 크지 않다고 보고 이 논문에서는 고려하지 않았다.

##### 2.1.1 돌극에 의한 퍼미언스

공극의 자로 길이를 원주방향 위치의 함수로  $g(\theta)$ 로 하면, 고정자를 평활하다고 생각한 경우에, 계자극의 돌

극성에 의한 단위 면적당 퍼미언스 분포  $p_p(\theta)$ 는 카터 계수를  $K_c$  라고 하면 다음식과 같다.

$$p_p(\theta) = \frac{\mu_0}{K_c g(\theta)} \quad (1)$$

그림 1은 돌극형 동기기의 계자극 돌극성에 의한 공극 퍼미언스 모델이고, 이 모델을 기본으로 식 (1)에 있어서의 자로 길이  $g(\theta)$ 를 산출한다. 그럼과 같이 전기 각  $\pi/2$ 의 범위에서 퍼미언스 분포를 규정하는 3 점을 생각한다. 결국,  $\gamma$ 의 위치에 있는 계자 극편에서 고정자 q 축 까지의 공극 길이  $g_{eqd}$  계자 극편에서 반경방향으로 고정자 축을 본 공극길이  $g_{max}$ , d 축 상의 공극길이  $g_{min}$  으로 하고, 이것을 식 (1)에 대입하여 q 축 상의 단위면적당 퍼미언스  $P_E$ , 자극편 위치의 단위면적당 퍼미언스  $P_A$ , d 축상의 단위면적당 퍼미언스  $P_M$  이 계산된다. 그 결과,  $p_p(\theta)$ 는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$p_p(\theta) = P_0 + \sum_{n=2,4,\dots} P_n \cos n\theta \quad (2)$$

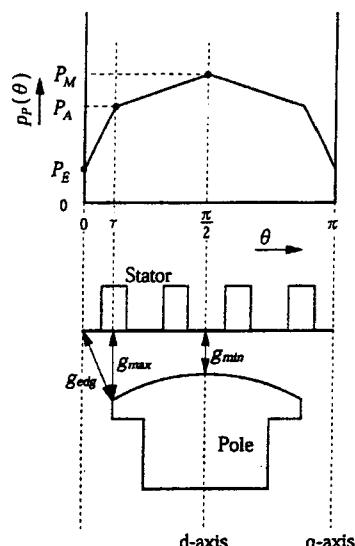


그림 1. 회전자의 돌극에 의한 퍼미언스 모델

### 2.1.2 고정자 슬롯에 의한 퍼미언스

그림 2에 고정자 슬롯에 의한 공극 퍼미언스 분포 모델을 보인다. 회전자를 자극편부에서 d 축으로 평균 공극 길이만큼 떨어진 평활 표면으로 생각한다.

공극 퍼미언스의 무차원화 표시  $q_s(\theta)$ 는 슬롯 수에 일치하는 차수의 맥동성분만으로 고려하면, 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$q_s(\theta) = 1 + Q_s \cos n_s(\theta) \quad (3)$$

결국 공극 퍼미언스는 고정자 슬롯 퍼미언스  $q_s(\theta)$ 와 회전자 돌극에 의한 단위면적당 퍼미언스  $p_p(\theta)$ 와의 곱에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$p(\theta) = p_p(\theta) \cdot q_s(\theta) \quad (4)$$

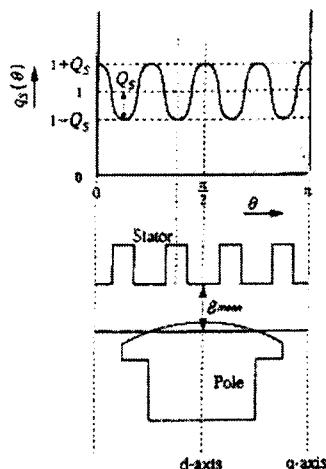


그림 2. 고정자 슬롯 퍼미언스 모델

### 2.2 공극 MMF 계산

그림 3에 돌극형 동기기의 계자 기자력 분포 모델을 보인다. 이 모델은 자극편에서 극간에 걸친 구간으로 계자 전류가 일정하게 분포하고, 기자력 분포에 일정한 경사가 있는 것으로 생각한다. 따라서, 실제에 계자 권선이 존재하는 위치와 다른 부분에 전류를 배치하는 것이 되지만, 이것은 공극 자속밀도 분포를 산정하기 위한 등가적인 기자력으로 해석할 수 있다.

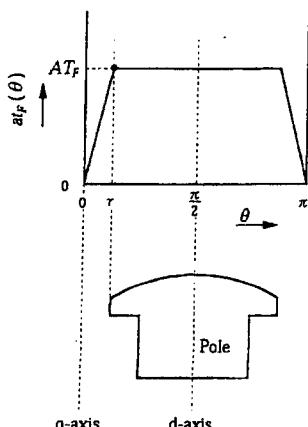


그림 3. 계자의 기자력 모델

계자 기자력 분포  $at(\theta)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$at(\theta) = \sum_{k=1,3,5,\dots} A T_k \sin k\theta \quad (5)$$

### 2.3 공극 자속밀도 계산

회전자 축의 좌표를 전기각으로  $\theta$ 로 표시하면, 공극 자속밀도  $B(\theta)$ , 단위면적당 퍼미언스  $p(\theta)$ , 그리고 기자력  $at(\theta)$ 는 서로 다음과 같은 관계가 있다.

$$B(\theta) = p(\theta) \cdot at(\theta) \quad (6)$$

### 2.4 역기전력 계산 및 THD 계산

공극자속밀도가 구해지면 이를 이용하여 쉽게 역기전력을 구할 수 있다. 공극 자속밀도가 계산되면, 전절( $t$ )이고 하나의 코일(single coil)에 유기되는 전압은 공극 자속밀도에  $2N_c l v$ 을 곱하면 구해지며 그 결과 식은 다음과 같다.[4]

$$e_{n.r.s} = 2N_c l v \left( B_n \sin \frac{\pi}{t} x + B''_n \cos \frac{\pi}{t} x \right) \quad (7)$$

이 때  $N_c$ 는 상당 권회수이며,  $l$ 은 권선의 유효 축방향 길이,  $v$ 는 회전자 표면에서의 선형 동기속도로 볼 수 있다.

만약 코일이  $W$  만큼 단절이고 상당 극당 슬롯수가  $q$ 이면 다음과 같이 계산된다.

$$e = \sum e_{n.r.s} \cdot k_{pn} \cdot k_{dn} \quad (8)$$

여기서, 단절계수( $k_{pn}$ )와 3상권선의 분포계수( $k_{dn}$ )는 다음과 같다.

$$k_{pn} = \sin n \frac{\pi}{2} \cdot \sin n \frac{W}{t} \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

$$k_{dn} = \frac{\sin(n \cdot \pi/6)}{q \sin(n \cdot \pi/6)} \quad (10)$$

따라서, 공극자속밀도를 구하면, 식 (8)에 의해 간단히 EMF를 구할 수 있다. 구해진 EMF의 고조파를 분석함으로써 THD (Total Harmonic Distortion)를 구한다.

고조파 성분을  $a_1, a_2, \dots, a_n$ 라고 할 때, THD 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$THD = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}}{a_1} \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

### 3. 1420 kW 돌극 동기기 해석 및 비교

앞에서 제시한 퍼미언스 방법을 사용하여 1420 kW 돌극형 동기 발전기에 대해 공극 자속밀도 계산하고, 역기전력을 계산하였다. 역기전력 THD 값을 실측치와 비교, 퍼미언스 방법의 유용성을 확인하였다. 아울러 고정자 권선의 단절권에 따라 역기전력의 THD를 계산, 비교하였다.

표1은 1420 kW 돌극형 동기발전기의 주요 사양 및 세원이다.

표 1. 1420 kW 동기발전기 사양 및 주요치수

항목	부호	값
선간 전압[V]		440
정격 전류 [A]		2329
결선방법		2Y
주파수 [Hz]		60
극수		4
상당 극당 슬롯수	$q$	5
고정자 슬롯 수	$N_s$	60
공극 관련 길이 [mm]	$g_{min}$	5
	$g_{mean}$	5
	$g_{max}$	5
	$g_{edg}$	42
자극편 시작각도(degree)	$\gamma$	20
고정자 내경 [mm]		550
고정자 슬롯 개구폭[mm]	$W_s$	6
계자 권회수	$N_f$	188
상당 권회수	$N_c$	20
축방향 길이 [mm]	$l$	550

퍼미언스 법에 의해 구한 공극 자속밀도 파형을 그림 4에 나타내었으며, 계산된 공극자속의 THD는 29.4 %였다. 그림 5는 고정자 권선의 단절 및 분포에 의한 역기전력 파형으로 역기전력의 THD는 8.72 %이다.

그림 6은 제작된 돌극 동기 발전기의 무부하시의 역기전력 실측 파형으로 한 주기분 만을 표시하였다. 실측된 THD 값은 1.02 % 이었다. 스큐를 고려한 역기전력 계산 결과를 그림 7에 나타내었고, THD 값은 1.98 %로 실측치와 거의 일치하는 값이다. 참고로 FEM 계산결과는 1.85 % 이었다.

고정자 권선의 단절에 따른 돌극 동기기의 역기전력에 대한 THD 값을 표 2에 나타내었고, 10/15 피치 단절권일 때가 가장 THD 값이 낮음을 알 수 있다.

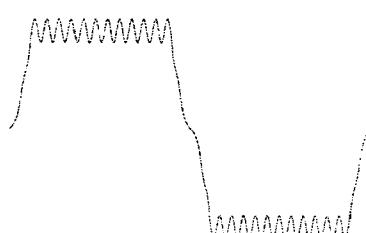


그림 4. 퍼미언스법에 의한 공극 자속밀도(스큐없음)

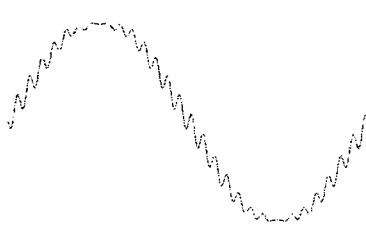


그림 5. 분포권, 단절권에 의한 역기전력(스큐없음)

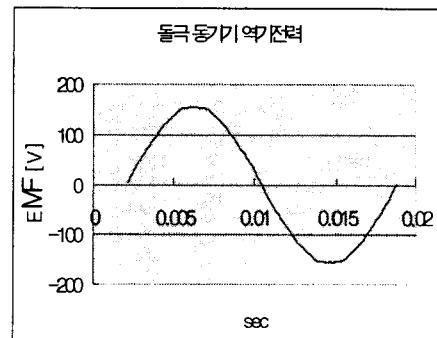


그림 6. 무부하 역기전력 실측 파형(THD=1.02 %)

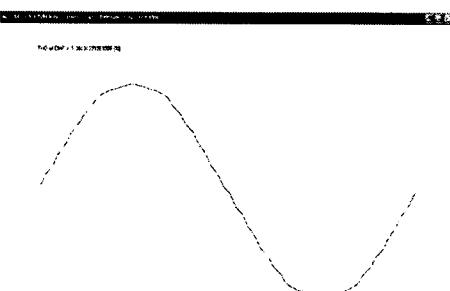


그림 7. 스큐고려 역기전력 계산 파형 (THD=1.98 %)

표 2. 고정자 권선 단절에 따른 THD [%] (스큐고려)

고정자 권선의 단절	Total Harmonic Distortion
13/15	14.48
12/15	10.88
11/15	6.14
10/15	1.98
9/15	7.14

#### 4. 결 론

퍼미언스법을 사용하여, 고정자 권선의 단절 정도에 따라 각각 동기 발전기의 역기전력의 고조파 및 THD를 쉽게 구할 수 있으며, 아울러 실측된 역기전력 값과 비교함으로써 계산된 THD 값의 실용성을 확인하였다.

돌극 동기기의 역기전력 고조파를 설계 초기 단계에서 계산, 고조파 성분 분석을 통해 역기전력의 THD를 계산함으로써 사용자의 요구에 적절하게 대응할 수 있다.

향후 계획으로 부하상태의 전기자 전류에 의한 전기자 반작용을 고려하고 또한 제동권선의 전류 및 공극 자속밀도에 미치는 영향을 검토할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- J. Arrilaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, Power system Harmonics, Chap. 5, John Wiley & Sons, 1985.
- J. H. Walker, "Slot Ripples in Alternator E.M.F Waves," Journal of the Institution of Electrical Engineers, Part II, Vol. 96, pp 81-92, 1949.
- K. Ide, K. Shima, M. Takahashi, "Practical Analysis Method of Induced Bar Currents of Salient-Pole Synchronous Machines due to Stator Slot Ripple," T. IEE Japan, Vol. 119-D, No. 7, pp 1004-1009, 1999.
- M. Liwschitz-Garik, Electric Machinery (5th ed), Chap.5, D. Van Nostrand Company, 1946.