

대전력 펄스 발전기 설계에 관한 연구

김영춘* 문태선, 김성태
두산중공업(주) 기술연구원

Design of Pulsed Generator

Yeong-Chun Kim*, Tae-Sun Moon, Seong-Tae Kim
R&D Center, Doosan Heavy Industries & Construction CO., LTD
yckim123@doosanheavy.com*, moonts@doosanheavy.com, kst522@doosanheavy.com

Abstract - 산업체 및 특수목적으로 대 출력의 펄스전원을 요구하는 장치가 많이 있으나 전원장치로는 거의가 커패시터나 직류전원에 PFN을 이용하여 펄스 전원을 형성시키고 있고, 이들을 대 전류 출력의 펄스전원으로 사용하기 위해서는 시스템이 매우 커지는 문제와 충전에 시간이 비교적 많이 소요되는 등의 제한이 있다. 펄스발전기는 상대적으로 크기가 작으며, 수 kV의 전압과 수십~수백 kA의 대전류 출력을 비교적 쉽게 얻을 수 있어 매우 좋은 펄스 전원장치이나, 설계 및 제작의 난이도가 매우 높아 기술적인 제한사항이 많다. 본 연구에서는 대전력 펄스발전기의 설계 및 제작에 있어서의 기술적 사항을 발표하고자 한다.

1. 서 론

펄스발전기(Compensated Pulse Alternator)는 고속으로 회전하는 로터의 운동에너지를 관성에너지의 형태로 저장하였다가 필요시에 대량의 전기에너지를 아주 짧은 시간에 방전하여 강력한 전기 펄스를 출력하는 전원공급 장치이다. 방전 시에는 먼저 필드코일의 회로를 구성하여 수 kA에서 수십 kA정도의 전류를 통하여 자기장을 형성한 후 전기자(armature) 회로와 보상 회로를 구성하여 전기자 회로를 통하여 수 백 kA에서 크게는 수 MA 정도의 대전류 펄스를 수 ms의 짧은 시간 동안에 방출한다.

짧은 시간 동안에 펄스발전기로부터 대전류가 방출될 경우 로터에 엄청난 역 토크가 작용하고 회전하는 축의 관성 에너지의 일부는 진동 현상으로 나타나게 된다. 따라서 펄스발전기는 운전 중 전기 및 기계적으로 충분한 신뢰성을 갖출 수 있도록 설계되어야 한다. 펄스발전기 설계 시에 고려되어야 할 필수 기술은 크게는 전기, 전력분야와 기계분야의 기술로 구분할 수 있으나, 각 분야는 상호간에 밀접히 연계되어있어 전문가들 간의 긴밀한 협조체제가 필히 요구된다.

특히 펄스발전기 회로 내에서 발생하는 강력한 전자기력과 회전하는 로터의 회전 원심력에 의한 재료의 내부 응력 및 구조적 특성, 로터-베어링의 동적 특성, 전기 저항에 의해 발생하는 부품의 열적 특성 해석 및 평가, 그리고 이를 고려한 시스템의 설계 및 제작 기법에 관한 기술이 필요하다. 보상펄스발전기의 제작은 매우 어려운 작업이며 고도의 기계 제작기술과 많은 시간과 노력, 주의를 필요로 한다.

제작 상 가장 어려운 부품은 로터이며, 이는 로터가 고속 회전체이면서 또한 내부에 복잡한 고 전류, 고전압의 전기회로를 가지며 또한 이들이 슬립링(slip ring)을 통하여 브러시(brush)로 전기적인 연결이 되어야 하기 때문이다. 복잡한 회로의 정교한 배치와 방전 시 회로에 작용하는 강력한 전자기적인 힘을 지지하기 위한 견고한 지지구조의 설계 및 제작기술이 필요하다. 또한 고정자(stator)도 방전 시 발생하는 로렌츠의 힘(Lorentz force)과 토크(torque), 펄스(pulse) 등을 지지할 수 있는 견고한 구조로 제작되어야 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 개요

펄스발전기를 디자인하기 위하여 모델링 하는 과정에 서 1차 모델은 전원의 입출력이 로터를 지지하는 베어링 span 내부에서 일어나는 형태를 선정하였다. 이러한 모델은 베어링 간격 및 지지부의 거리에 따라 전원 입, 출력부가 비례적으로 늘어나기 때문에 로터의 회전 안정성에 중요한 문제를 일으키게 된다. 이러한 시스템에서 가능한 로터의 회전수를 알아보기 위하여 모의실험을 해 본 결과, 최초 설계한 로터의 회전 수 7500 rpm에 상당히 못 미치는 수치가 도출되었다.

슬립링이 리쯔 권선(litz wire)의 입, 출구 바깥에 위치하는 디자인은 베어링 간격이 너무 커서 운전 시 진동은 물론 위험속도(critical speed) 선정 문제로 인해 시스템에 상당한 불안정을 초래하는 결과를 보였다. 또한 기계적인 장치와 전기적인 장치가 시스템 내부에 혼재함으로써 전기적인 장치에 문제가 발생할 경우 유지 보수에 많은 시간이 투여되어야 하는 불합리함이 있었고, 로터의 적층된 코어의 폭(lamination core width)와 고정자의 적층 폭(lamination width)의 차이가 커서 최초 설계 시 요구되었던 pole face에서의 자기장 값이 나타나질 않았다.

일반적으로 로터에 저장되는 회전운동 에너지는 로터가 회전하는 속도의 제곱에 비례하기 때문에 회전속도를 높이는 것은 매우 중요하다. 베어링 지지구조에는 영향을 주지 않고 고 에너지를 저장할 수 있는 구조를 선택하기 위하여 로터의 전원 출력부를 베어링 간격의 바깥부분으로 위치시켰으며 중공 로터를 이용하여 전원 출력부를 로터 끝으로 빼 내었다. 일반 발전기가 사인 파(sine wave) 형태의 발전을 하는 것과는 달리 펄스 발전기는 원하는 시간에 전력을 뽑아내는 것이 주목적이므로 얻어지는 파형은 그림1과 같이 피크 파형에 가깝게 된다.

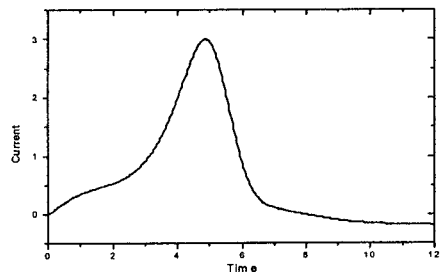


그림1 펄스 발전기의 기본 파형

펄스발전기의 전기자와 여자권선(field coil)에는 각각 보상 권선이 부착된다. 전기자에 부착되는 보상권선은 폐회로(closed loop) 형태가 되고 로터에 부착되는 보

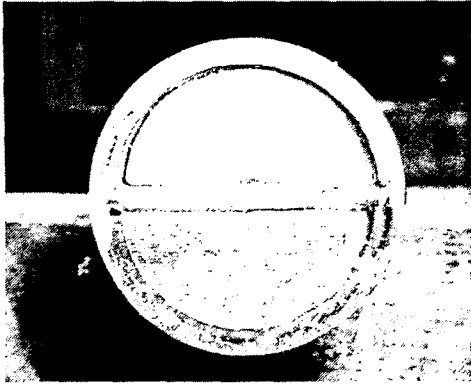


그림 6 로터 내부에 삽입될 전원 출력부

구리 바 사이의 충분한 절연을 확보하기 위하여 에폭시 글라스를 삽입 진공 함침 하였고, 회전에 의한 미끄러짐을 방지하기 위하여 썬기 형태로 결합되도록 하였다.

2.3 시스템 하우징

펄스 발전기의 하우징은 2개의 부분으로 분리될 수 있도록 구성되었다. 전체 원형 실린더의 형태로 가공이 되어야 하나 고정자 내부에도 보상 권선이 설치되어야 하기 때문에 하우징을 상하로 분리하였다. 하우징 내부에 설치되는 고정자 보상 권선은 외부에서 형상을 구성한 후 하우징에 삽입되고, 이후 정삭 과정을 거쳐 설계된 치수로 만들어진다.

고정자에 설치되는 적층된 코어는 하우징에 썬기 형태로 삽입이 되고 각각의 코어는 4개의 조각으로 구성이 되며 코어 plate는 금형 가공 후 각각을 절연 코팅하였다. 그림 7은 제작 완료된 펄스발전기의 하우징을 나타낸 것이다. 하우징 내부의 코어부분과 고정자 권선은 서로 맞닿아 있다. 전체 코어는 3개의 볼트로 연결 고정되는데 작은 2개의 볼트는 단순히 코어만 지지하고, 나머지 한 개의 볼트는 하우징 좌 우측덮개에 연결되어 코어에 가해지는 충격을 흡수하는 역할을 한다.

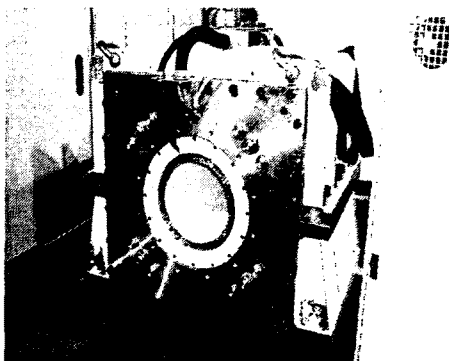


그림 7 하우징의 구조

상, 하부의 하우징에 코어 module이 설치되면 중심에 고정자 보상 권선이 삽입되고 하우징의 위, 아래가 체결된다. 고정자 권선 사이의 공간은 고정자 권선 작업에 의한 모양의 불균일이 예측되므로 G10 재질이 삽입된 후 에폭시 레진이 채워진다. 이후 레진의 열처리 작업을 거친 후 고정자 보상 권선이 감겨 있는 실린더는 내경을 넓히는 작업에 의해 원하는 치수를 갖게 된다.

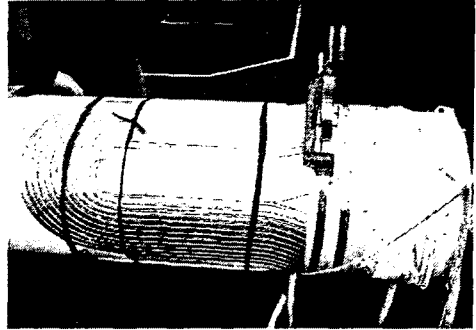


그림 8 로터의 보상 권선을 감는 과정

이것은 보상 발생 시점을 제어하는 것과 방전 순간에 전달되는 충격력을 고정자 권선이 감기는 코어에 전달함으로써 보상 권선이 받는 충격을 최소화하고 권선을 보호하고자 함이 그 목적이다. 보상 권선의 곡률 부분을 제외한 축, 보상 권선이 직선으로 배열되는 곳은 서로 45도 각도를 이루며 pole 면에 접촉되도록 배치된다. 이러한 이유로 고정자 보상 권선의 배열은 회전자 보상 권선과는 달리 곡률 반경과 중심이 서로 다른 것을 알 수 있다.

보상 권선은 권선 내부에 레진을 채운 후 감는 방법과 감은 후 레진을 채우는 방법이 있으나 전자는 레진이 경화함에 따라 작은 곡률에서 깨어지는 현상이 발생하므로 본 시스템에서는 후자의 형태를 택하였다.

3. 유리섬유 함침 공정

3.1 유리섬유 물성

본 시스템 제작에는 유리섬유 안(glass yarn)이 적용되었다. Prepreg는 앞서 언급한 바와 같이 섬유에 레진이 첨가된 상태의 제품을 의미하며 별도의 레진을 첨가 필요 없이 열 가공에 의해 레진이 녹아 형상이 만들어지는 형태이나 내부에 기포가 많이 생기는 단점이 있다. 안 계열은 순수한 섬유만으로 출시되므로 권선작업 후 레진을 부어서 열 가공을 하여야 하나 레진의 침투가 유리섬유의 감긴 밀도에 반비례하는 단점이 있다. 권선작업 이후 열 가공 전에는 진공에 의해 내부 기포를 제거하는 것이 무엇보다도 중요하다. 일반적으로 기공(void)은 전체 부피 대비 35~50% 정도로 나타나는 것이 보통이나 기공의 함유 여부에 따라 유리섬유의 밀도를 조절할 필요가 있다.

고 경량, 고 탄성 소재중의 하나로 탄소섬유(carbon fiber)가 많이 알려져 있으나 탄소 섬유는 열 및 전기 전도도가 우수한 전도성 재질이므로 고 자기장이 걸리는 곳에 사용할 경우 표면에 와전류가 발생할 수 있으므로 바람직하지 않다. 레진의 열처리는 복합재 가공 과정에서 가장 중요한 작업이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 일반적인 레진의 열처리 공정을 살펴보면 x축을 시간, y축을 온도로 보았을 때 일정 시간 온도를 올리는 과정과 온도를 유지하는 과정 그리고 일정시간 온도를 낮추는 과정으로 분류되는 사다리꼴 형태의 그래프를 갖게 되며 사용되는 재료의 특성에 따라 구배의 수가 가감될 수 있다.

상승 시간을 너무 짧게 잡으면 레진이 충분한 반응을 일으키지 못하고, 온도 하강 시간을 짧게 할 경우는 레진에 균열이 생길 가능성이 높다. 또한 레진은 열에 의한 화학 반응으로 경화가 되는데, 화학 반응시 자체 화학 반응에 의해 열이 발생하고 이것은 내부의 온도를 높이는 역할을 하므로 레진이 열 가공 중 산화되는 현상을 방지하기 위하여 세심한 관찰을 필요로 한다.

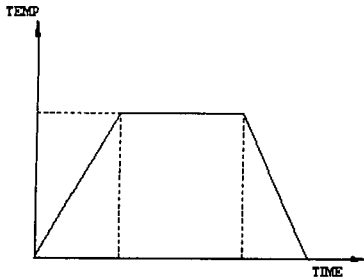


그림 9 일반적인 열 경화 곡선

3.2 유리섬유 물성에 따른 권선 두께 계산

로터의 표면에 리쯔 권선을 권선 작업하고 난 이후, 바깥 면을 유리섬유로 감싸게 된다. 로터의 회전 속도가 증가함에 따라 유리섬유는 로터의 원심력(즉, 리쯔 권선의 원심력)을 견뎌내야 하므로 유리섬유의 적절한 재질 선택과 두께 선정은 매우 중요한 요소이다. 여기에서는 로터에 삽입되는 코어가 로터와 일체 형으로 움직인다는 것과 로터가 solid mass라는 가정을 하여 계산을 하였다. 각 계산에 필요한 기계적 변수는 표1에 나타내었다. 로터 표면의 리쯔 권선은 wave winding 방식으로 감기므로 전체 질량을 계산하기 위해서는 리쯔 권선이 감기는 원주 면의 전체 면적을 리쯔 권선이 차지하는 면적으로 나눈 리쯔 권선의 권선계수(winding factor (C_w))를 이용한다. 리쯔 권선의 두께와 로터의 길이를 이용하여 C_w 의 값을 구하면 약 0.5의 값을 구할 수 있다. 즉, 리쯔 권선의 질량 M 은

$$M = C_w(\pi R_o^2 - \pi R_i^2)\rho_L \cdot L \cdot C_m = 12.7 \text{ kg} \quad (1)$$

가 되며 로터에 작용한 원심력은,

$$F_c = MR\omega^2 = 1.4 \times 10^6 \text{ N} \quad (2)$$

을 얻을 수 있다. 여기에서 R 은

$$R = \frac{R_o + R_i}{2} \quad (3)$$

로 구한다. Glass fiber에 인가되는 인장력의 합(F)은 그림 10에서 알 수 있듯이 반원 부에 작용하는 전체 합력에 해당되므로,

$$F = \int_0^\pi F_c \sin \theta d\theta \quad (4)$$

식(4)에 의하여 $F=2.796 \times 10^6 \text{ N}$ 을 구할 수 있다.

실제 필요한 힘은 두 배의 F 가 되어야 하고 이 두 배의 힘을 글라스 파이버가 견뎌야 하므로 허용 안전율(k)을 적용하여 (5)식에 의해 계산하면,

$$kF \leq 2\sigma tL(1 - C_v) \quad (5)$$

구하고자 하는 글라스 파이버의 두께(t)는 $2.014 \times 10^{-3} \text{ [m]}$ 가 된다.

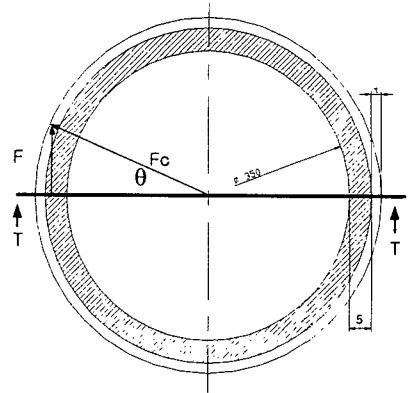


그림10 Glass fiber 두께 계산

표1 시스템 기계적 변수

| 기호 | 표기 | 단위 | 값 | 비고 |
|----------|------------------------------|-------------------|--------------------|----|
| h | Litz wire thickness | m | 0.005 | |
| ρ_L | Litz copper density | kg/m ³ | 8930 | |
| ρ_G | Glass fiber density | kg/m ³ | 2100 | |
| σ | Glass fiber tensile strength | Pa | 2.45×10^9 | |
| N | Rotation Number | rpm | 7500 | |
| R_i | Glass fiber inner radius | m | 0.175 | |
| R_o | Glass fiber outer radius | m | 0.181 | |
| L | Rotor length | m | 0.85 | |
| C_w | Litz wire winding factor | | 0.5 | |
| C_v | Glass fiber volumetric | | 0.5 | |
| C_m | Hoop mass factor | | 0.5 | |
| M | Litz wire mass | kg | 12.734 | |
| R | Mean radius of Litz wire | m | 0.178 | |
| k | Safety factor | | 1.5 | |
| F_c | Centrifugal force of rotor | N | | |
| F | Total tensile force | N | | |

4. 절연재 선정

4.1 절연재 Epoxy Glass의 물성 값

본 시스템에서는 기계적 강도와 전기적 절연성이 우수한 Epoxy glass를 대부분의 절연재로 채택하였다. Epoxy glass는 유리 섬유를 일 방향 혹은 이 방향의 직물을 겹쳐서 에폭시로 몰딩한 제품을 말하며 밀도가 $1.7 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ 의 경량인 반면 고강도를 나타내는 것이 특징이다. 전기적인 특성으로는 표면 고유저항이 $3.2 \times 10^{15} \text{ (\Omega)}$, 체적 고유저항이 $4.2 \times 10^{16} \text{ (\Omega cm)}$ 의 값을 갖는다.

그림 11은 필스 발전기의 전원 출력 부분이다. 각 브러시는 공압 실린더에 의해 동작이 되며 로터에서 발생된 출력 전압은 로터 종단 부에 설치된 슬립 링을 통하여 브러시로 전달이 된다. 각 브러시에 모여진 전류는 그림 11의 동판을 통하여 전달되며, 그림 11의 동판은 2개가 1조로 구성된다. 표2는 제작된 필스발전기의 사양을 나타낸 것이다.

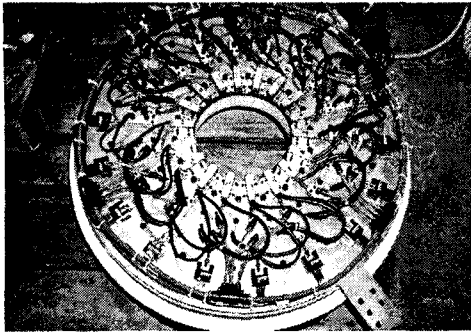


그림11 펄스발전기 전원 출력부

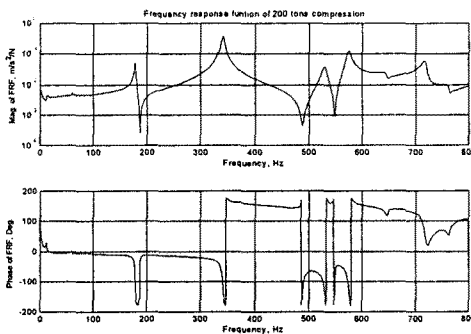


그림 12 회전자 고유진동수 실험 결과

표2 펄스발전기 사양

| | |
|------------------------------------|-------------------|
| Inertial Moment(kgm ²) | 10.7 |
| Rotor Speed [rpm] | 7500 |
| Stored Energy [MJ] | 3.3 |
| Peak Voltage [kV] | 5 |
| Peak Current [kA] | 50 |
| Location of Armature | Rotating Armature |
| Number of Poles | 4 |
| Pulse Width [ms] | 2 |
| Excitation Type | External |
| Core Type | Iron |
| # of wires/conductor | 7 |
| Compensate Type | Selective Passive |

3. 결 론

펄스발전기에 대한 설계 및 제작이 성공적으로 완료되어 현재 시운전 중에 있으며, 본 펄스발전기를 설계 및 제작 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 에너지 효율을 높이기 위해 air-gap winding을 하고, 로터가 고속으로 회전하게 되므로 로터의 적층된 코어외부는 원심력을 지지할 수 있는 유리섬유나 케블라섬유 등의 강인한 소재를 사용하는 것이 좋다.
- 2) 로터 적층판은 고속 회전 안정성을 확보하기 위해

충분한 강성을 갖도록 강하게 압착되고 적절한 간섭을 갖도록 기워 맞춤을 적용해야 한다. (그림12 참조)

- 3) 로터의 적층된 코어외부 권선은 에폭시를 진공 함침하여 기공을 최소화하여 운전 시 크랙 발생 가능성을 제거한다.
- 4) 로터 제작 주요 공정 후에 불평형 질량을 최소화하기 위해 기계적인 가공을 실시하는 것이 좋다.
- 5) 펄스의 형상은 여자코일과 보상코일의 기울임 각도와 관계가 밀접하므로 해석을 통하여 원하는 파형이 나오도록 기울임 각도를 선정하여 제작하여야 한다.
- 6) 필드 코일에 전원을 인가하여 발생하는 자기장을 측정할 결과 설계 시 적용한 자기장 값과 차이가 거의 없으므로 전자기력 해석 시 2차원 해석을 수행하여도 충분하다.
- 7) 슬립링-브러쉬 시스템은 고속 회전 시 유체역학적 효과에 의해 브러쉬가 부상할 수 있으므로 적절한 형상 및 압력을 유지할 수 있도록 설계해야 한다.

현재 진행되고 있는 로터의 회전 안정성을 검증하는 실험이 끝나면 모든 조립이 완료되어 시스템의 실제 출력 시험이 진행될 예정이다.

[참 고 문 헌]

1. 3차 전열추진 기술세미나, ADD, 15-1, 1999
2. 4차 전열추진 기술세미나, ADD, 17-1, 2000
3. M.L.Spann, S.B.Pratap, M.D.Werst, A.W. Walls, and W.G. Fulcher, IEEE Transaction on Magnetics, VOL.25, NO.1, JAN 1989
4. "The continued testing and evaluation of the engineering prototype compulsator and The evaluation of advanced compulsator concepts 1980," CEM, Univ. of texas at Austin, Final Report 1981
5. W.F. Weldon, "Assessment of potential research areas for improving rotating electrical machines for pulsed power application," DOE/ET/52029-T2, May 1979
6. 김영춘 외 3, "적층된 로터에서 적층판 압착력의 강성 효과," 한국소음진동공학회 학술대회 논문집, 춘계, 2002
7. A. E., Fitzgerald, C., Kingsley, Jr., and S. D., Umans, Electric Machinery, 5/E SI units, McGraw-Hill, Inc., 1992
8. T. Wildi, Electrical Machines, Drives, and Power Systems, 3rd edition, Prentice Hall, 1997
9. R. N., Dawson and R., Miller, Generator Design & Development Engineering, TGE Report 92-37