

다상 영구자석 동기발전기 및 제어기에 관한 연구

김현철*, 김혜리*, 오광교*, 차대석*, 김수용*, 김대광**
전자부품연구원*, 맥시스**

A Study on a Multi-phase Permanent Synchronous Generator and its Controller

Hyun Chul Kim*, Hye Ri Kim*, Kwang Kyo Oh*, Dae Seak Cha*, Su Yong Kim*,
Dae Kwang Kim**
KETI*, McSYS**

ABSTRACT

본 논문에서는 9상 영구자석 동기발전기 시스템을 제안한다. 통상 3상 발전기의 출력은 전압리플을 포함하기 때문에 DC 링크에 대용량 전해 커패시터를 필요로 한다. 반면, 본 논문에서 제안하는 발전기는 상수가 많기 때문에 DC 링크의 전압리플이 크게 줄어들어 대용량 전해 커패시터를 필요로 하지 않아 전체 발전 시스템의 수명을 확보하는 것이 용이하다. 시뮬레이션 및 실험을 통해서 제안된 시스템의 장점을 확인한다.

1. 서론

본 논문에서는 엔진, 9상 영구자석 동기 발전기, 단상 인버터로 구성된 발전 시스템을 제안한다. 통상적으로 널리 사용되는 3상 영구자석 동기 발전기의 출력에는 전압리플이 포함되기 때문에 DC 링크에 대용량 전해 커패시터를 주로 사용하고 있다. 이러한 대용량 전해 커패시터는 전체 발전 시스템의 수명을 제한하는 중요한 요소로 알려져 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 9상 영구자석 동기 발전기를 적용한 엔진 발전 시스템을 제안한다. 9상 영구자석 발전기의 경우, 상수(phase number)가 많기 때문에 출력 전압을 다이오드 정류할 경우, 통상적인 3상 영구자석 발전기에 비해 DC 링크의 전압리플이 크게 줄어들게 되어 DC 링크에 대용량 전해 커패시터를 필요로 하지 않는다는 장점을 가지게 되고 전체 발전 시스템의 수명을 확보하는 것이 용이하다.

이하에서는 발전기의 상수에 따른 출력의 전압리플을 시뮬레이션을 통해서 확인하고 9상 영구자석 동기 발전기 출력의 전압리플이 충분히 작음을 확인한다. 또한, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 인버터의 동작 특성을 확인한다.

2. 본론

2.1 발전기의 상수에 따른 출력전압 리플

영구자석 동기 발전기의 상수에 따른 DC 링크의 전압의 리플 수준을 확인하기 위해 발전기의 상수가 N 이고 상전압이 동일 진폭을 가진 균일한 위상차를 가진 이상적인 정현파라고 가정하자. 이러한 가정하에서 각 상전압은 $k=1, \dots, N$ 에 대해

$$v_k(t) = \sqrt{2} V_s \sin(\omega t - \frac{2\pi}{N}k)$$

로 주어진다. 이제 발전기의 출력에 그림 1과 같이 다이오드 정류회로의 다이오드가 추가되었다고 가정하자. 다이오드가 이상적이라면 DC 링크 전압은

$$V_{DC}(t) = \max_{1 \leq k \leq N} v_k(t) - \min_{1 \leq k \leq N} v_k(t)$$

로 주어진다. 구간 $\frac{\pi}{2} - \frac{2k\pi}{N} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} + \frac{2k\pi}{N}$ 에서 DC 링크 전압을 구해보자. 먼저, $\max_{1 \leq k \leq N} v_k(t) = v_k(t)$ 임은 자명하다. N 이 짝수인 경우에 $\min_{1 \leq k \leq N} v_k(t) = v_{N/2}(t)$ 가 된다. 반면, N 이 홀수인 경우에는 $\frac{\pi}{2} - \frac{2k\pi}{N} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}$ 구간에서는 $\min_{1 \leq k \leq N} v_k(t) = v_{(N+1)/2}(t)$ 이 되고 그 이외의 구간에서는 $\min_{1 \leq k \leq N} v_k(t) = v_{(N-1)/2}(t)$ 인 것을 확인할 수 있다.

표 1 상수에 따른 리플률

Table 1 Ripple ratio for phase numbers

상수	리플률
3상	13.3%
6상	13.1%
9상	1.5%

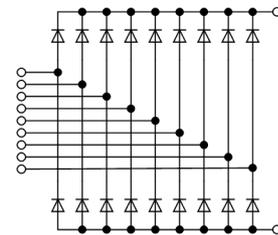


그림 1 9상 다이오드 정류기

Fig. 1 9-phase diode rectifier

이상이 의미하는 바는 N 이 짝수이면 위상이 반전된 발전기의 상전압 쌍이 항상 존재하여 DC 링크 전압리플이 커지는 반면, 홀수인 경우 그러한 쌍이 존재하지 않아 상대적으로 리플이 감소한다는 점이다. 이는 시뮬레이션을 통해서도 드러나는데, 표 1을 통해 나타난 것처럼 6상의 경우 3상과 리플률이 유사하지만, 9상의 경우에는 6상에 비해 리플률이 크게 줄어든다.

2.2 9상 영구자석 발전기

본 절에서는 9상 영구자석 발전기의 인버터 설계절차를 기술하고 설계된 인버터의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

2.2.1 인버터 설계

9상 영구자석 발전기용 인버터는 그림 2와 같이 구성된다. 그림 2의 인버터의 특징은 DC 링크에 대용량 전해 커패시터가 없다는 점이다. 그림에 나타난 커패시터는 스위칭시에 발생하는 서지전압을 억제하기 위한 스너버 역할을 한다.

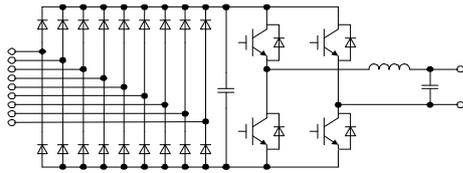


그림 2 9상 발전기용 인버터
Fig. 2 The inverter for 9-phase generator

인버터 스위칭 주파수는 인버터의 응답성과 스위칭 손실을 감안하여 6kHz로 하였다. 인버터의 LC 출력필터의 정수는 $L=1\text{mH}$, $C=33\mu\text{F}$ 로 선정하였다. 이때, 출력필터의 차단주파수는 약 876Hz로서 출력전압의 주파수가 60Hz이고 인버터의 스위칭 주파수가 6kHz이므로, 설계된 출력필터는 인버터의 60Hz 주파수는 통과시키고 고주파 스위칭 성분을 감쇠시키는 저주파 필터로 동작하게 된다. 인버터가 AC 60Hz, 220V의 전압을 출력하도록 하기 위해서 그림 3과 같이 전압제어 및 전류제어 루프를 구성하였다. 전류제어는, PI (proportional integral) 제어기 형태로 설계하였고 제어기의 게인은 아래의 식 (1)과 같이 선정하였다.

$$\omega_{cs} = \frac{2\pi f_s}{10}, k_{cp} = L\omega_{cs}, k_{ci} = R\omega_{cs} \quad (1)$$

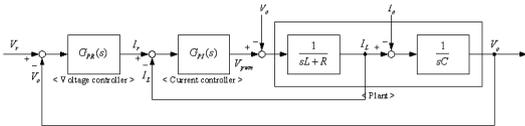


그림 3 인버터의 전압제어기
Fig. 3 Voltage controller for the inverter

인버터의 출력 주파수가 60Hz이므로 출력전압이 기준전압을 추종하려면 해당 주파수 대역에서 제어기의 이득이 충분히 커야한다. PI 전압 제어기를 구성하는 경우, 해당 주파수 대역의 이득을 높이기 위해서는 제어기의 게인이 과도하게 커져 안정성 문제를 야기할 수 있다. 따라서, 전압 제어기를 다음과 같은 PR (proportional resonant) 제어기^[1] 형태로 설계하였다.

$$G_{PR}(s) = k_{vp} + \frac{2k_{vi}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_r^2} \quad (2)$$

PR 제어기의 정수는 시뮬레이션을 통해서 적절하게 선정하였다. 폴 브릿지 인버터의 스위칭 방식에는 바이폴라 방식과 유니폴라 방식이 있는데, 본 논문에서는 스위칭 손실 및 THD 측면에서 유리한 유니폴라 방식을 채택하였다.^[2]

이상과 같이 인버터를 설계하여 시뮬레이션을 통해 특

성을 확인하였다. 그림 4는 10kW 저항부하에 대한 기준전압과 출력전압, 출력전압의 THD를 나타낸다. 그림을 통해 확인할 수 있는 바와 같이 설계된 인버터는 기준전압을 잘 추종하고 출력전압의 THD는 3% 이내이다.

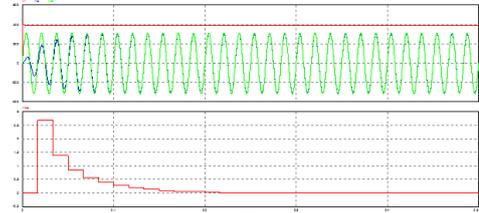


그림 4 시뮬레이션 결과(위: 입력전압, 기준전압, 출력전압, 아래: 출력전압의 THD)
Fig. 4 Simulation result(Upper: input voltage, reference voltage, output voltage, Lower: THD of output voltage)

그림 5는 인버터 실험결과로서 5kW 저항부하에 대한 출력전압과 출력전류를 나타낸다. 실험은 DC 입력전압을 공급하여 실시하였다. 또한, 인버터 출력전압의 THD는 1kW~9kW 저항부하에 대해 3%이며 인버터 효율은 최대 97%수준임을 확인하였다.

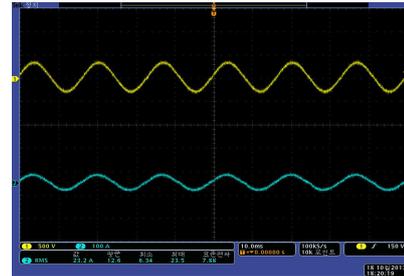


그림 5 인버터 실험결과
Fig. 5 Inverter experimental result

3. 결론

본 논문에서는 9상 영구자석 발전기를 이용한 엔진 발전 시스템을 제안하고 인버터의 성능을 시뮬레이션 및 실험을 통해서 확인하였다. 현재 9상 영구자석 발전기는 설계 중이고 이후 전체 시스템에 대한 실험을 진행할 예정이다.

본 논문은 중기청의 기술혁신개발사업의 “육해상용 10kW급 다상 영구자석형 발전기 및 커패시터리스 제어기 개발”과제 지원으로 연구되었음

참고 문헌

- [1] Poh Chiang Loh, Daniel Nahum Zmood, "A Comparative Analysis of Multiloop Voltage Regulation Strategies for Single and Three Phase UPS System", IEEE Trans. Power Electron., Vol.18, No5, SEPTEMBER 2003
- [1] 노의철, 정규범, 최남섭, 전력전자공학, 제3판, 문운당, 2011.