

주파수 변동에 강인한 수차발전기 여자시스템 개발

박만기*, 류호선*, 이의택*, 문주영*, 차한주†
 *전력연구원, †충남대학교

Development of a excitation control system for synchronous generator robust for frequency variation

Park Manki*, Ryu Hoseon*, Lee Uitaek*, Moon Jooyoung*, Hanju Cha†
 *KEPCO Research Institute, †Chungnam National University

ABSTRACT

전력계통은 안정된 전압과 주파수의 전력수급이 요구되는 가운데 발전기의 안정성은 주요 요소이다. 그런데 수차발전기 운전 중 부하 탈락 시 급격한 주파수 상승에 의한 발전기 과전압 발생은 발전기 여자시스템의 제어신호인 전압실효값 오차에 기인한 것이다. 이런 오차를 최소화하고 발전기 전압을 안정시키기 위해 ZCP(Zero Crossing Point)와 FPGA를 이용한 주파수 검출영역 확장과 DFT(Discrete Fourier Transform) 알고리즘을 이용하여 안정된 전압실효값을 계산하는 기법을 설계하였다. 실험결과, 기존 57~63Hz 주파수 영역의 DFT 대비 확장된 30~90Hz 대역의 전압실효값 오차는 최대 24.68%에서 0.22%로 대폭 개선되었다.

1. 서론

전력계통의 대형발전기 전압을 제어하는 디지털 여자시스템의 신뢰성은 전력품질과 안정성을 유지하는 필수 요구조건이다. 최근 B수력 수차발전기 부하차단시험에서 부하 차단 시 수차 및 관로 내 물(水)에 의해 급격한 주파수 상승과 발전기 과전압이 발생하였다. 이것은 기존 여자시스템에 적용된 60Hz ±5% 기반의 DFT 알고리즘으로 전압실효값을 연산하기 때문이다.

본 논문에서는 자체기동발전기의 특성과 발전기 전압을 제어하는 여자시스템의 프로세서가 수행하는 기존 60Hz±5% 기반의 DFT에서 주파수 변동 시 실효값 연산 오차를 분석하였다. 수차발전기 부하차단 시 주파수가 82.8Hz까지 상승한 것을 감안하여 주파수 검출범위를 30~90Hz로 설정하고, 전압실효값 오차를 최소화하기 위해 ZCP와 FPGA 조합의 주파수 검출과 이 출력신호에 따라 DFT알고리즘을 이용한 계산 기법을 설계하고 검증한 내용을 다루었다.

2. 본론

2.1 발전기 여자시스템 구성

B수력발전소 수차발전기 여자시스템은 발전기에서 생산된 전력을 공급원으로 하는 직접여자방식(Static Excitation)이다(그림 1). 여자시스템 제어기의 제어신호 출력값은 싸이리스터로 구성된 정류기로 보내지는 게이트펄스열이다.

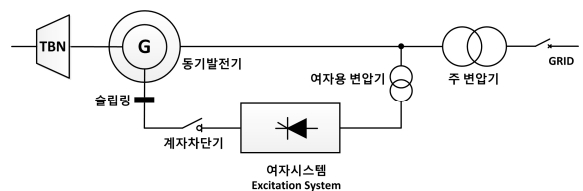


그림 1 수차발전기 직접여자방식의 여자시스템
 Fig. 1 Static excitation system for Hydraulic turbine generator

2.2 수차발전기 특성

2.2.1 자체기동발전

전력거래소는 “계통운영보조서비스” 체제를 운영하고 있으며 현재 자체기동 서비스는 전계통 정전 또는 광역정전 발생에 대비하여 7권역별로 주·예비 자체기동발전소 14개소를 지정 운영하고 있다^[1]. 이에 발전기 여자시스템은 시송전선로 전압 조정, 무효전력 서비스에 대한 안정성이 요구된다.

2.2.2 부하 탈락 시 주파수 및 발전기 단자전압 변동

B수력발전소 1호기 발전기는 정격전압은 11,000V, 정격전류 874.8A 출력 15MW, 정격속도 514rpm이다. 발전기 부하차단시험에서 1/4부하에서 수차속도(주파수)는 기준속도 대비 18% 증가, 4/4부하에서는 38% 증가했다. 또한, 단자전압도 기준전압 11.21kV와 대비하여 각각 3%, 31% 상승했다(표 1)^[2]. 이것은 주파수 상승 시 그 실효값이 낮아져 그 오차에 의해 발전기 단자전압이 상승된 것이다.

표 1 B수력발전소 #1 Unit 부하차단시험 측정값
 Table 1 Load shedding test values of #1 unit in the B HP Plant

시험항목		차단부하			
		1/4부하 3.6 MW	2/4부하 7.2 MW	3/4부하 10.7 MW	4/4부하 13.7 MW
수 차 속 도	부하시 rpm	514	514	514	514
	최대시 rpm	610	642	663	709
	상승률 %	18	24	28	38
전 압	부하시 kV	11.21	11.17	11.07	11.01
	최대시 kV	11.55	12.25	12.82	14.51
	상승률 %	3	9	15	31

2.3 수차 발전 여자시스템 설계

2.3.1 기본주파수 영역의 실효값과 DFT 연산 기법

기본주파수 기반의 DFT 연산 기법은 기본주파수 57~63Hz 범위 내에서 최적의 전압실효값을 계산할 수 있고 그 허용오차는 0.02Hz이다^[3]. 일반적인 시간영역의 전압을 주파수영역으로

변환하는 표현은 식(1)과 같다. 고조파 n차의 푸리에 코사인 성분(real part : 실수부)과 사인 성분(imaginary part : 허수부)의 값을 얻어 식(2)에 의해 전압실효값을 계산한다.

$$V(k) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

여기서, N은 샘플링 수, k는 주파수 파라미터이다.

$$V_{RMS} = \sqrt{(V_{real}^2 + V_{imag}^2)/2} \quad (2)$$

표 1의 부하차단시험 결과치에 대해 True-RMS & DFT 시뮬레이터(36~90Hz)를 이용하여 전압실효치를 분석한 결과(표 2), 57~63Hz 영역에서 전압실효값 7.17~6.87V는 60Hz 기준의 7.07V 대비 약간의 오차가 존재하지만 일반적으로 발전기 운전의 안정영역에 해당하는 전압제어 신호이다. 그러나 주파수가 상승에 따라 전압실효값이 감소하면서 연산오차율이 증가되므로 이 기법은 안정영역을 벗어나는 전압제어를 하게 된다.

표 2 주파수별 여자시스템 전압실효값 추정치 및 60Hz 기반의 오차율
Table 2 Estimate of volt-RMS & 60Hz-based error ratio for frequency change using True-RMS&DFT simulator

주 파 수 [Hz]	36	57	60	63	70	90	입력치 10V _{P-P}
전압_RMS [V]	4.10	7.18	7.07	6.87	6.34	5.32	
연산오차율 [%]	41.96	1.61	0	2.84	10.38	24.68	

2.3.2 ZCP와 FPGA의 주파수 검출과 DFT 실효값 계산

기본주파수 변동에서 입력신호 V_{ac} 의 안정된 실효값을 계산하기 위해서 그림 2와 같은 알고리즘을 사용했다. 그림 2의 상단부는 실효값을, 하단부는 주파수를 계산한다. 프로세서는 입력되는 주파수 신호에 따라 주파수별 설정된 코사인과 사인 테이블값을 선택하여 전압실효값 V_c 를 계산, 출력한다.

주파수 검출은 입력신호 V_{ac} 를 ZCP하여 생성된 펄스신호의 상승점과 다음 한 주기의 상승점 구간에 14.4kHz의 클럭 수를 FPGA에 계산한 후 그 값을 프로세서에서 주파수로 계산된다.

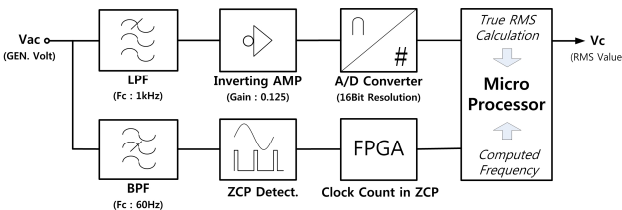
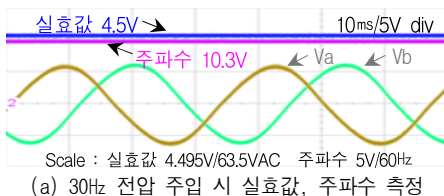


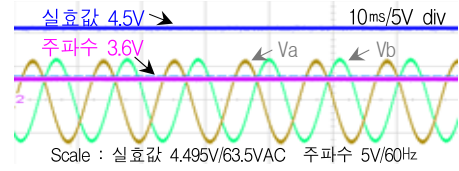
그림 2 영점검출기법과 FPGA를 이용한 주파수 검출 및 DFT 계산블록도
Fig. 2 True RMS & DFT Algorithm block diagram using ZCP & FPGA

2.4 실험결과

개선된 DFT 실효값 계산 기법을 적용한 실험용 MGI(Measurement & Gating Interface) 보드를 이용하여 두 가지의 실효값을 측정했다. 첫 번째는 30Hz와 90Hz 성분의 2상 전압을 각각 주입 시 실효값이 거의 동일했다. 두 번째는 30~90Hz의 연속가변 주파수를 주입할 경우 실효값이 변동되지 않았다. 따라서 30~90Hz 성분의 입력전압에 대한 전압실효값은 0.22% 오차범위에서 안정됨을 확인했다(표 3).



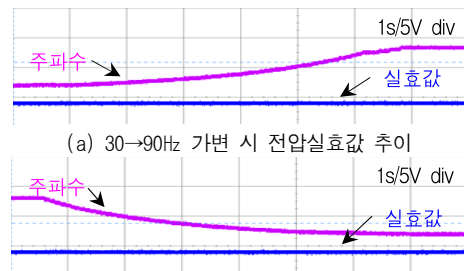
(a) 30Hz 전압 주입 시 실효값, 주파수 측정



(b) 90Hz 전압 주입 시, 실효값, 주파수

그림 3 30Hz, 90Hz 전압 주입 시 DFT 실효값 측정

Fig. 3 DFT RMS values of voltage injection with 30Hz, 90Hz component



(a) 30→90Hz 가변 시 전압실효값 추이

그림 4 30↔90Hz 주파수 연속주입 시 전압실효값 추이

Fig. 4 Trend of voltage RMS values for variable frequency injection(30↔90Hz)

표 3 개선된 DFT 기법에 대한 주파수별 전압실효값

Table 3 Voltage RMS measurement of improved computation for variable frequency

주 파 수 [Hz]	36	57	60	63	70	90	입력 전압
전압_RMS [V]	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	
연산오차율 [%]	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	

3. 결론

수차발전기 부하탈락 시 주파수 상승에 의한 발전기 과전압을 억제하는 방법으로 여자시스템 제어신호인 발전기 단자전압의 실효값 오차를 최소화 하는 ZCP & FPGA를 이용한 주파수 측정과 DFT 계산 기법을 구현하였고, 63~90Hz 변동 시 실효값 오차는 2.84~24.68%에서 0.22% 오차로 개선된 결과를 확인하였다. 실증실험은 할 수 없었으나 현장 적용 예정인 여자시스템은 발전기 안정성과 신뢰성을 크게 향상시킬 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 전력시장운영규칙, 한국전력거래소, 2016.05
- [2] B수력발전소 제1호기 부하차단시험 결과, ○○(주), 2015.4
- [3] Murty V.V.V. Yalla, "A Digital Multifunction Protective Relay", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7 No.1, pp. 193-201, January 1992
- [4] R.W.Wall, "Simple Methods for Detecting Zero Crossing", Proceedings of The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Paper #2000291 pp. 1-5, 2012.3