

200MW 석탄화력 순환 유동층 보일러 이차공기송풍기용 H-브릿지 멀티레벨 인버터 현장적용

金倬奭[†], 柳皓善^{*}

Field Application of H-Bridge Multi-level Inverter for Fluidized Bed Combustion Boiler Secondary Air Fan

Bong-Suck Kim and Ho-Seon Ryu

요 약

본 논문은 발전소의 이차공기송풍기를 가변 회전수 제어하여 소내 소비 전력을 절감하고 전동기의 직입기동에 의한 스트레스를 줄이기 위하여 실증 적용된 200MW 석탄화력 발전소 순환 유동층 보일러 이차 공기 송풍기 구동용 H-브릿지 멀티레벨 인버터에 관한 것이다. H-브릿지 멀티레벨 인버터는 독립적으로 절연된 직류 부를 갖는 저전압의 단상 인버터(셀 인버터)를 다수 직렬 접속하여 고전압 3상 전압을 출력하는 Cascaded H-브릿지 전압형 인버터이다. 전력연구원은 6.6kV, 1MVA급 인버터 개발, 발전소에 설치, 보일러 점화 전/후 시험 및 계통 병입 후 부하 시험 등을 국내 최초로 성공적으로 완료하였다. 현재 200MW 석탄화력 발전소 이차 공기 송풍기 구동용 인버터는 상업 운전 중에 있다. 본 논문에서는 개발된 H-브릿지 멀티레벨 인버터, 기존 발전 설비와 신규 인버터 시스템의 인터페이스 부분에 해당하는 보일러 DCS(Distributed Control System : 분산 제어 시스템) 로직, 계통 병입 후 시운전 결과에 대하여 상세히 기술하였다.

ABSTRACT

This thesis proposed H-Bridge Multi-Level Inverter for Fluidized Bed Combustion Boiler Secondary Air Fan in 200MW thermal power plant. The adjustable speed drive systems improve the efficiency in lightly load condition and extend the life span of motor by limiting the over current at starting. H-Bridge Multi-level Inverter is composed of the several series low voltage power cell inverters, which have the independent isolated dc link, in each phase. KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) has successfully completed to develop, install, and commission H-Bridge Multi-level Inverter(6.6kV, 1MVA). This thesis gives a full detail about H-Bridge Multi-level Inverter, proposed boiler DCS(Distributed Control System) logic, and commissioning test result.

Key Words : H-Bridge Multi-level Inverter, Fluidized Bed Combustion Boiler, Secondary Air Fan

1. 서 론

최근 화력발전소의 발전소 단위용량 증대에 따른 발전소 보조 기기도 대용량화로 소내 소비 전력량도 증가하고 있다. 전력산업의 경쟁 체제 하에서 발전소 내 전력 소비를 절감을 통한 원가 절감은 발전사 경영의 주요 현안 사항이므로, 대용량 화력발전소라 하더라도 기저부하보다는 부하조정의 역할이 강하여 정격 속도

[†]교신저자 : 정희원, 전력연구원 일반연구원

E-mail : toeic74@hanmail.net

*정희원, 전력연구원 선임연구원

접수일자 : 2007. 8. 16

1차 심사 : 2007. 8. 30

심사완료 : 2007. 9. 10

로 운전하던 팬, 펌프 등을 필요 부하에 따라 회전수 제어하여 전력절감을 할 필요성이 대두되고 있다. 발전소 내 에너지 소비의 대부분은 고전압 전동기 부하이다. 카메라의 조리개가 구경을 변화시켜 카메라에 들어오는 빛의 양을 조절하듯이, 기존 베인 방식은 송풍기 입구 측 베인의 각을 조절해서 풍량을 조절한다. 이때 3상 유도전동기는 정속도로 유지하여 최대 풍량을 발생시키고 있으며, 필요한 공기량은 베인에서 조절하는데, 베인의 조립 때문에 많은 저항 손실이 발생한다. 반면, 고전압 인버터는 고전압 대용량 유도 전동기에 입력되는 전압 및 주파수 가변을 이용하여 전동기의 속도를 제어하여 전동기 경부하시 베인에서 소모되는 에너지 절감효과를 얻을 수 있는 전력변환 장치이다. 보일러 연소에 필요한 만큼의 풍량을 인버터로 전동기 속도 제어에 의해 발생시킬 수 있으므로, 베인 방식에 의한 저항 손실이 없다.^[1]

국내의 경우 발전소, 수처리 시설 등에서 사용하고 있는 고전압 대용량 유도 전동기의 전압정격은 주로 6,600V이나, 현재 국산으로 상용화되어 있는 고전압 인버터 출력 전압정격은 3,300V를 넘지 못해 인버터 입/출력에 변압기를 활용해 6,600V 전동기를 구동하는 시스템을 사용하고 있다. 이런 시스템은 고비용, 넓은 설치 공간, 시스템 효율 감소, 변압기 누설 인덕턴스와 대지 정전 용량간의 공진 발생 등 많은 문제점으로 고전압 전동기 구동용으로 인버터 보급에 있어 많은 장애가 되고 있다. 또한, 인버터 적용 시 모선의 고조파 영향, PWM 전압에 의한 전동기 열화, 진동, 절연, 에너지 절감액 평가 저하 등 종합 엔지니어링 기술의 미흡으로 더욱 인버터 적용의 어려움을 겪고 있다. 고전압 대용량 인버터의 적용이 저전압 중, 소형 인버터에 비해 에너지 절감 차원에서 상대적인 효과가 우수함에도 불구하고 초기 투자비, 외국 제품 사용으로 인한 A/S 및 유지 보수비용 과다 등의 이유로 설비 적용을 기피하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 전원의 전력품질을 보장하여 시장 경쟁력이 구비된 전력 토폴로지를 이용하여 인버터를 개발하였다. 국내 개발 제품의 적용 시 이런 문제가 크게 해소될 것으로 판단된다.

본 논문에서는 H-브릿지 멀티레벨 인버터(6.6kV, 1MVA), 기존 발전 설비와 신규 인버터 시스템의 인터페이스 부분에 해당하는 보일러 DCS (Distributed Control System : 분산 제어 시스템) 로직, 시스템 건전성 확인을 위한 다이내모메타 부하 시험, 보일러 점화 전/후 시운전 및 계통 병입 후 시운전 결과에 대해

여 상세히 기술하였다.

2. 석탄화력 주요 송풍기

고전압 전동기의 주요 부하인 팬, 펌프 등의 유체계에 인버터를 적용하는 가장 큰 이유는 일반적으로 부하 토크가 회전속도의 제곱에 비례하고, 축 동력이 회전속도의 3제곱에 비례하는 2승 저감 토크의 특성을 갖고 있기 때문이다. 유도 전동기를 이용하여 펌프, 팬 등의 유체를 이송하는 장치에서 인버터에 의한 회전수 제어가 종래의 고정 주파수 제어 방식에 비해 30~70%의 전기 에너지 절감이 가능하기 때문이다. 그림 1은 표준 석탄화력 계통도이며, 화력발전소에 사용되는 주요 송풍기는 다음과 같다.

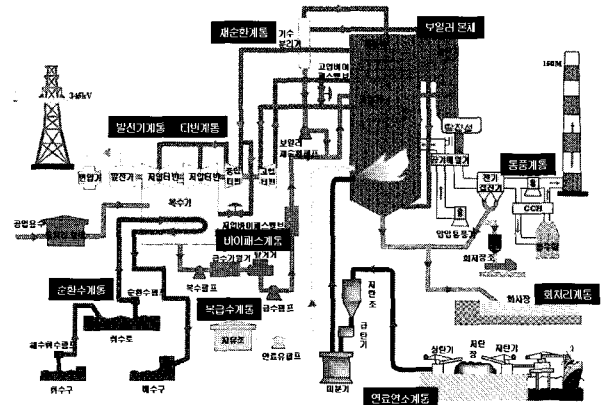


그림 1 표준석탄화력 계통도

Fig. 1 The Diagram of Standard Power Plant

- 1) 일차 공기 송풍기(PAF : Primary Air Fan) : 석탄이 보일러에서 연소가 잘 될 수 있도록 미분기로 미세한 가루로 만든 후, 분쇄된 미분탄을 연소실로 불어넣기 위해, 공기를 미분기에 공급하는 송풍기.
- 2) 이차 공기 송풍기(SAF : Secondary Air Fan) : 일명 압입송풍기(FDF : Forced Draft Fan)라고도 함. 분쇄된 미분탄이 연소하는데 필요한 연소용 공기를 보일러에 공급하는 송풍기.
- 3) 유입 송풍기(IDF : Induced Draft Fan) : 보일러에서 연소된 연소가스를 연돌로 뽑아내는 송풍기.
- 4) 가스 재순환 송풍기(GRF : Gas Recirculation Fan) : 보일러에서 나오는 연소가스가 가진 열로 보일러 수냉벽에 공급하는 물을 가열하는 절탄기 출구에서 400℃ 정도의 연소가스를 노(Furnace) 하부로 공급하여 증기온도를 조절하는 송풍기.

3. 순환 유동층 연소 보일러

유동층이란 연소로 내부에 유동매체(석탄, 석회석, 모래, 회재 등)를 충전한 후, 하부 노즐로부터 공기를 주입함으로써 고체입자를 유체와 같이 움직이게 하여 혼합·연소시키는 공정을 의미한다. 하부 노즐의 공기 주입에 따라 고체 층에 기포가 발생하고(물의 기포 발생과 동일) 기포들에 의한 고체 입자의 혼합 및 유동이 야기되어 물과 같은 유체 움직임을 보인다. 유속이 점차 증가함에 따라 입자가 비산되어 연소로 밖으로 날아가 없어지게 되는데, 비산 유출되는 입자를 사이클론을 통해 포집하여 반응기로 다시 주입하는 경우가 순환 유동층의 기본 개념이다. 유동층 연소 보일러는 고온(600℃ 이상)으로 가열된 유동화 상태의 고체 층에 석탄을 주입하여 서로 유동, 혼합시킴으로써 석탄의 연소를 도모한다. 유동층 보일러의 특징으로는 다음과 같다.^[2]

1) 다양한 연료의 사용 가능 : 유연탄, 무연탄, 폐플라스틱, 폐슬러지, 폐타이어, 바이오매스 등의 비교적 다양하고 광범위한 입도(0~6mm)를 가지는 연료의 사용 가능.

2) 고효율, 친환경적인 신발전 기술 : 비교적 낮은 온도(900℃ 이하)에서 연소함으로써, NOx의 발생이 거의 없고, 석회석을 탈황제로 사용하여 직접 연소로내로 투입하여 95% 이상의 탈황효율을 가지며 발생 회재 전량을 시멘트 원료로 재활용이 가능하다.

3) 발전설비의 Compact화 가능 : 별도의 탈질 및 탈황 장치가 필요 없고, 굵은 입도의 연료 사용이 가능하여 미분기가 필요 없다. 열전달이 유동입자에 의해 일어나기 때문에 열전달 효율이 높아 장치의 Compact화 가능하다.

표 1 미분탄 발전 보일러 vs 유동층 발전 보일러
Table 1 Per unit values of the system parameters

특성	미분탄 발전 보일러	유동층 발전 보일러
사용연료	석탄 (0.01mm 이하 입자)	다양한 연료 (6mm 이하 입자)
발전효율	36~38%	36~43%
설비 구성	분쇄기, 미분기, 보일러, 탈황장치, 탈질장치, 스팀터빈	분쇄기, 보일러, 스팀터빈
NOx 발생량	400~600 ppm	50~200 ppm

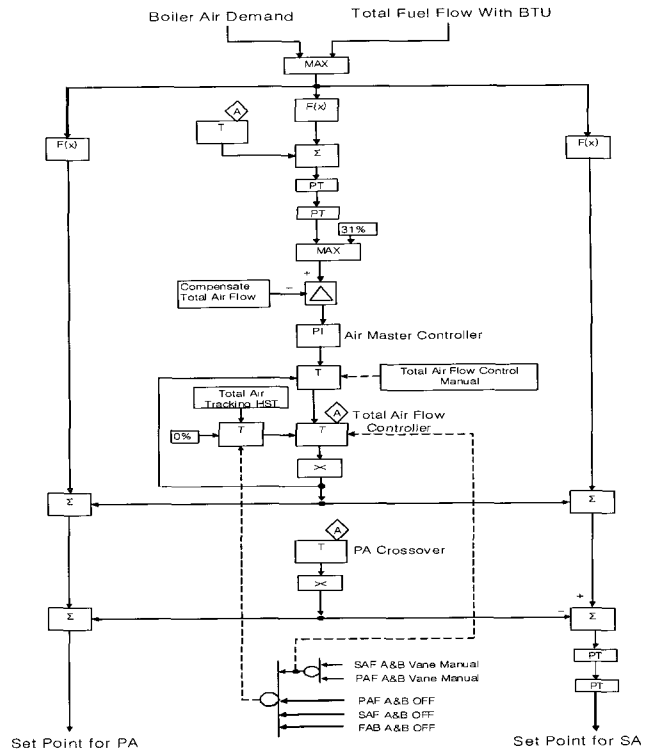


그림 2 베인 운전 총 공기량 제어
Fig. 2 Total Air Flow Control with Vane

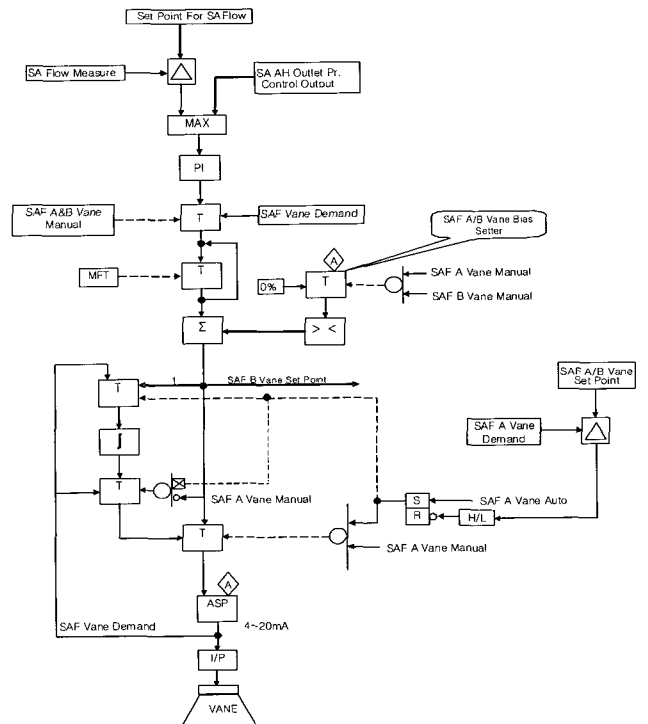


그림 3 베인 운전 이차 공기량 제어
Fig. 3 Secondary Air Flow Control with Vane

그림 2와 그림 3은 인버터 적용 전 기존 총 공기량 제어 블록도와 이차 공기량 제어블록도이다. 총 공기량 제어에 의한 이차 공기 지령치와 이차 공기 풍량 실측치와의 차는 압력제어에 의한 이차 공기 지령치와 이차 공기 풍압 실측치의 차와 비교하여 큰 값으로 선택되어 PI 제어를 하게 된다. SA Crossover에서 운전원에 의하여 A호기와 B호기의 풍량의 비를 결정할 수 있다. 이차 공기 제어 블록도의 마지막 부분은 Bumpless 로직 블록이다. Bumpless 로직 블록에 의해 이차 공기 지령치의 급격한 변화에도 난조를 방지하여 안정적인 보일러 제어가 가능하다.^[3]

4. 개발된 H-브릿지 멀티레벨 인버터

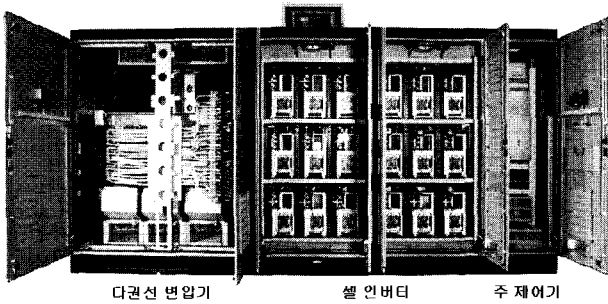


그림 4 6.6kV, 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터
Fig. 4 6.6kV, 1MVA H-Bridge Multilevel Inverter

그림 4는 발전소에 실증 적용된 6.6kV, 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터이다. SAF 구동용 6.6kV 1MVA 멀티레벨 H-bridge 인버터는 그림 5와 같이 입력 다권선변압기와 총 18대의 셀 인버터로 구성된다. 표 2는 개발된 6.6kV, 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터의 사양이다. 인버터 출력전압의 레벨수를 증가시키기 위해 분리된 직류전원을 갖는 셀 인버터출력을 시스템 1상 당 6대 씩 연결하여 상 전압 기준 13레벨, 순간전압 기준 25레벨의 유사정현파 출력을 생성한다.

전력용 반도체 소자 기술 분야의 비약적인 발전에 힘입어 전력전자 기술은 고도로 성장하여, 대용량 전력 변환 장치인 H-브릿지 멀티레벨 인버터 시스템을 가변속 전동기 구동 시스템에 적용 가능하게 하였다. H-브릿지 멀티레벨 인버터의 가장 큰 장점은 저전압 반도체 소자를 사용한 셀 인버터를 이용하여 전압의 레벨을 증가시켜 정현파에 가까운 고전압 출력을 손쉽게 얻을 수 있다는 것이다. 이를 위해 각각의 셀 인버터에 독립된 절연 전원을 공급하기 위하여 다권선 변압기를 사용하고, 기존의 6 Pulse 정류방식에 비해

여 낮은 입력 단 THD를 얻을 수 있다.^[4]

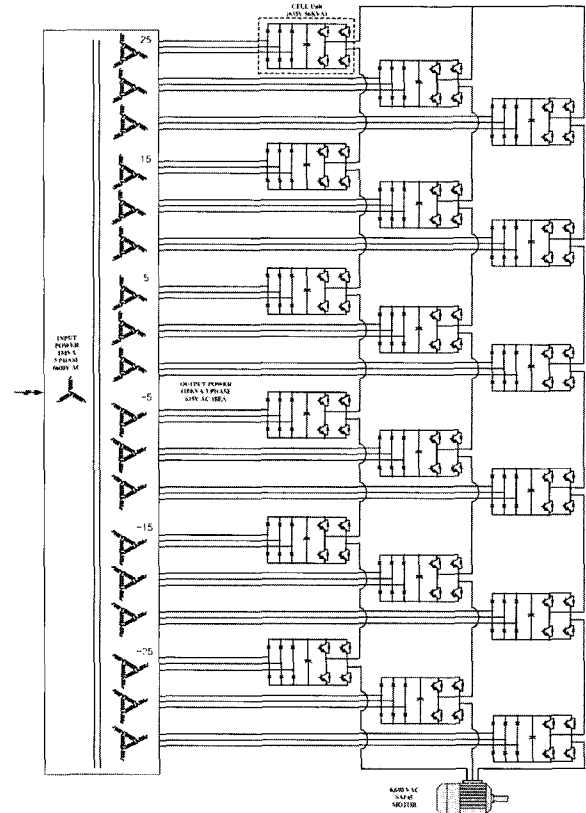


그림 5 H-브릿지 멀티레벨 인버터 전력회로 구성도
Fig. 5 Configuration of H-Bridge Multi-level Inverter

표 2 H-브릿지 멀티레벨 인버터 사양

Table 2 Specification of H-Bridge Multi-level Inverter

인버터 형태	H-Bridge 멀티레벨 인버터
정격 용량	1MVA
입력전압	3상 6,600V ± 10%
입력변압기	1.2MVA, 다권선 변압기
입력주파수	50/60Hz
입력 측 고조파	THD<5%
입력 측 역률	0.95
출력전압	3상 0~6,600V, 순간전압
출력주파수	0Hz~120Hz
출력전압 Level	상 전압 : 13레벨 순간 전압 : 25레벨
셀 인버터 수량	총 18대 (1상 당 6셀 인버터 직렬연결)
효율	97% (정격부하 기준)
적용 규격	IEC-146-1

각각의 셀 인버터에 독립된 절연 전원을 공급하고 전력품질을 위하여 다권선 변압기가 사용된다. SAF 구동용 인버터는 입력 다권선 변압기를 사용해 각 셀 인버터의 직류전압을 서로 분리한다. 이를 위해 입력 변압기 2차 측에는 셀 유닛 수와 동일한 수량의 권선을 설치한다. 다이오드 정류회로 사용으로 인해 발생하는 전류왜형의 크기를 최소한으로 하기 위해 변압기 2차 권선을 인버터 출력 3상 기준으로 그룹하여 각 그룹 상호간에 10도의 위상차를 갖도록 하였다. SAF 구동용 인버터 운전 시 각 셀 유닛의 3상 다이오드 정류부로 인해 발생하는 5차 7차 11차 13차 17차 19차 23차 25차 고조파 성분을 변압기 1차측 전류합성과정에서 최대한 상쇄시켜 30%~100% 부하 사용시 인버터 입력전류 THD 크기를 5% 이하 유지하였다.

5. 현장 적용전 신뢰성 운전을 위한 다이나모메타 부하시험

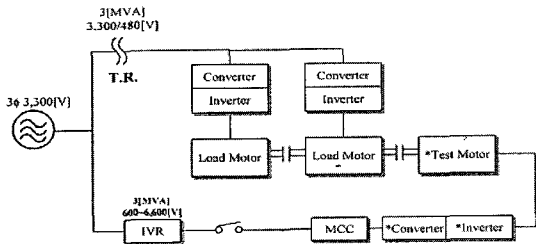
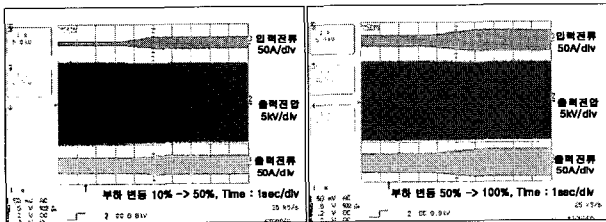
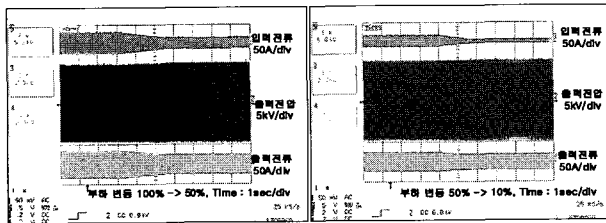


그림 6 다이나모메타 부하시험 구성도
Fig. 6 Diagram of Dynamometer for Load Test



(a) 부하변동 10%→50% (b) 부하변동 50%→100%



(c) 부하변동 100%→50% (d) 부하변동 50%→10%

그림 7 다이나모메타 부하변동에 따른 인버터 출력 파형
Fig. 7 Inverter Output waveform about Load Change Test with Dynamometer

그림 6은 6.6kV, 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터의 건전성을 확인하기 위한 다이나모메타 부하 시험 구성도이다. 실제 다이나모메타에 1MVA 유도전동기를 연결하여 부하시험을 실시했으며, 그림 7은 다이나모메타의 부하 변동(10%↔100%)에 따른 시험 결과이다.

6. 200MW 석탄화력 보일러 점화 전 시험

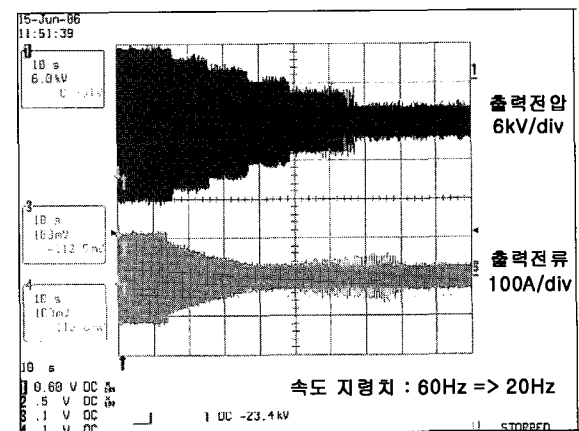
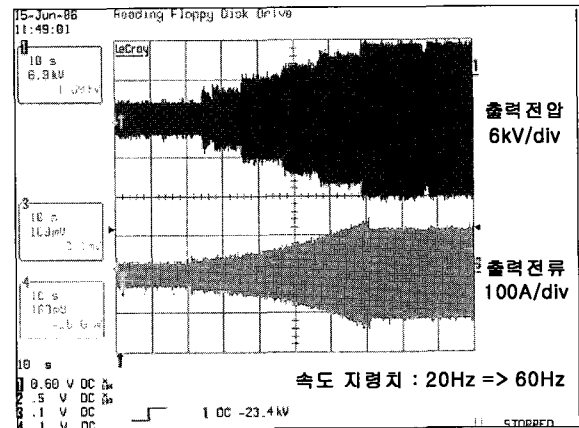


그림 8 보일러 점화 전 인버터 가속/감속 출력파형(1)
Fig. 8 Output waveform about Inverter Acceleration/Deceleration before Boiler Ignition

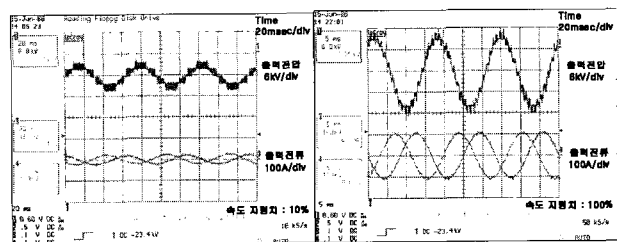


그림 9 보일러 점화 전 인버터 가속/감속 출력파형(2)
Fig. 9 Output waveform about Inverter Acceleration/Deceleration before Boiler Ignition

발전소 보일러 점화전에 보일러 SAF 제어로직 최종 지령치에 따라서 풍량 피드백 제어와 인버터 속도 지령치대 실제속도의 변화분을 측정하기 위한 시험을 실시하였다. 그림 8은 보일러 점화 전 가속/감속 시험 결과로 Local 지령치에 따른 인버터 출력전압과 출력 전류 파형을 나타내고 있고, 상세 출력파형은 그림 9와 같다. 속도 지령치가 상승 할수록 출력 상전압의 파형은 싸인 파형과 유사함을 확인할 수 있다. 그림 10은 인버터 속도 지령치 변화에 따른 풍량과 노내 압력 파형을 보이고 있는데, 속도 상승에 따라서 풍량과 노내 압력이 상승함을 알 수 있다.

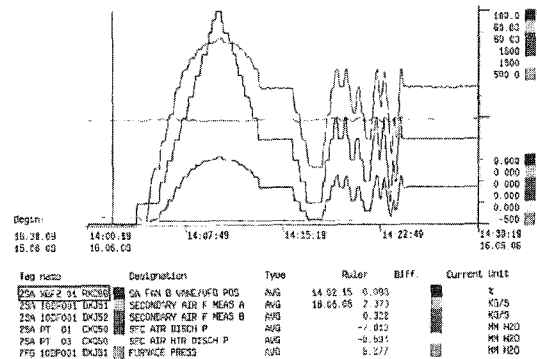


그림 10 보일러 점화 전 풍량 변동 트렌드
Fig. 10 Air Flow Change Trend before Boiler Ignition

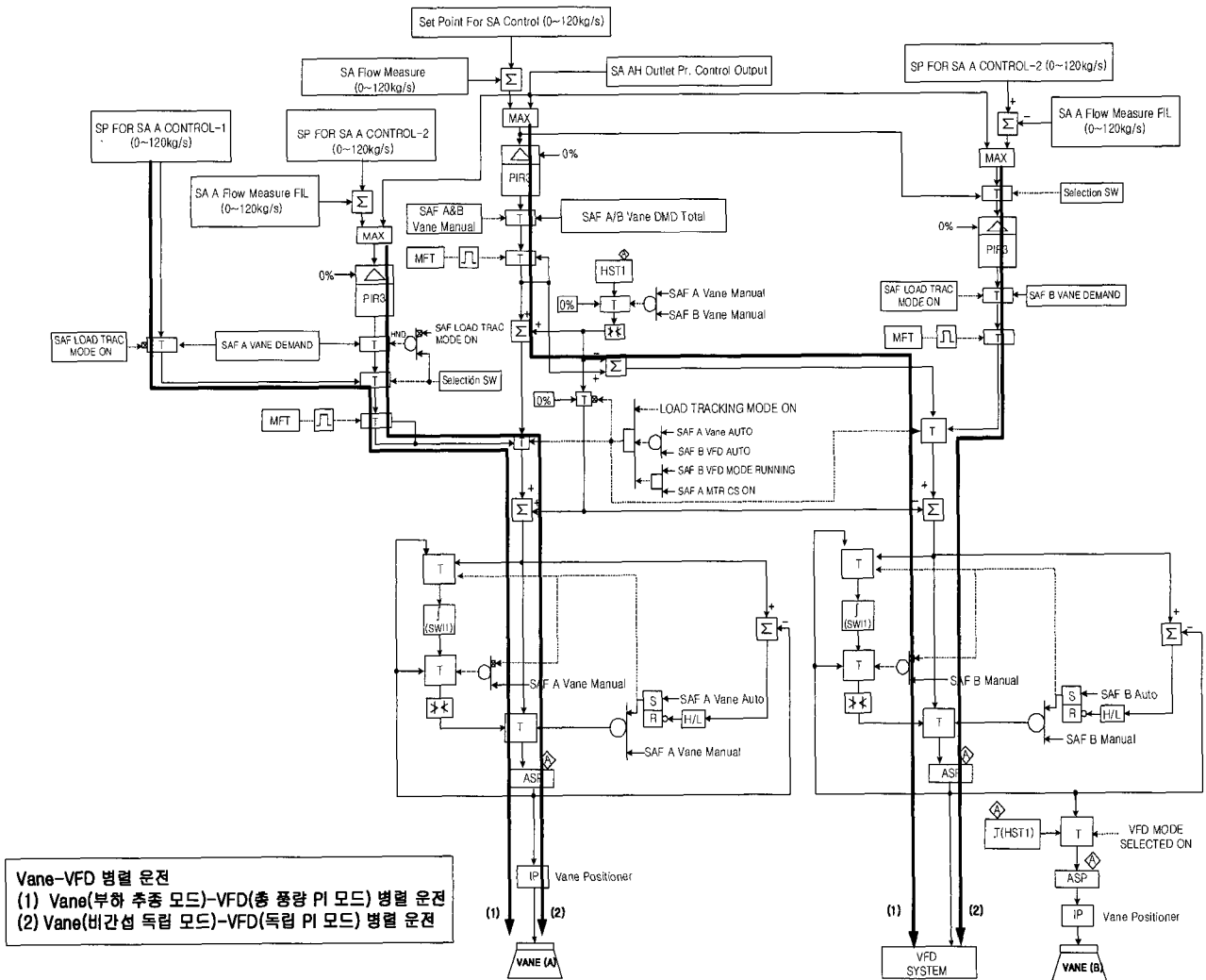


그림 11 제안하는 이차 공기 제어 블록도
Fig. 11 The Block of Proposed Secondary Air Control

7. SAF용 인버터-Vane 병렬운전 제어로직

그림 11은 인버터와 Vane이 병렬운전을 하기 위하여 본 논문에서 제안하는 보일러 SAF 공기량 제어 블록도이다. 다양한 제어 로직의 시험을 위하여 기존의 제어 블록도에 2가지 모드를 추가하여 시험을 실시하였다. 첫 번째 부하중 모드인 인버터와 Vane 병렬운전시 압력 변화에 따른 풍량 변화를 고려하여 Vane은 발전기 출력 지령치에 따라서 비례(P) 운전 되게 하였고, 이때 인버터는 Vane의 개도가 열린 후 총 풍량 중에 부족분만 PI 제어에 의하여 제어된다. 두 번째 모드는 비간섭 독립 PI 모드를 추가하여 시험하였는데 발전기 출력에 따라서 Vane 및 인버터는 각각 자신의 지령치에 따라서 PI 제어를 하게 된다.

그림 12와 그림 13은 발전소 운전원이 SAF Vane과 인버터 각각의 단독운전은 물론 병렬운전도 쉽게 할 수 있도록 MMI(Man Machine Interface)을 신설한 부분이다. 한눈에 SAF 속도 지령치, 풍량 그리고 각종 보호계통의 알람 및 운전모드 변경이 가능하도록 설계되어 있다(그림 12). 특히 그림 13에서는 SAF 단독 운전 및 병렬 운전 일때의 지령치에 대한 풍량 제어 상태를 볼 수 있도록 설계 되어 있음을 알 수 있다.

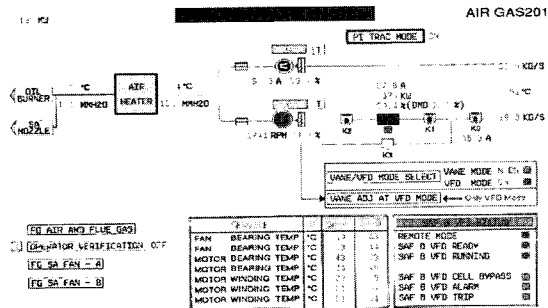


그림 12 발전소 운전용 MMI (1)
Fig. 12 MMI for Power Plant Operator (1)

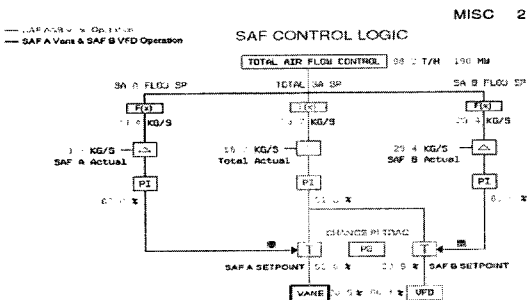


그림 13 발전소 운전용 MMI (2)
Fig. 13 MMI for Power Plant Operator (2)

8. 200MW 석탄화력 보일러 점화 후 SAF용 인버터-Vane 병렬운전 시험결과

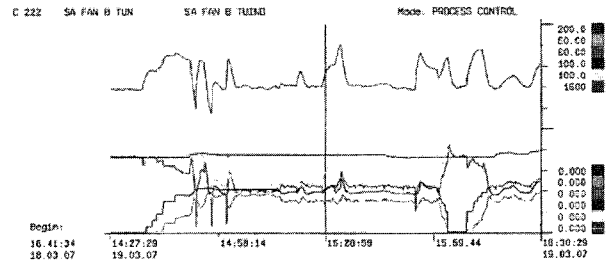


그림 14 SAF-A 베인 & SAF-B 인버터 (Load Track Mode)
Fig. 14 SAF-A Vane & SAF-B VFD at Load Track Mode

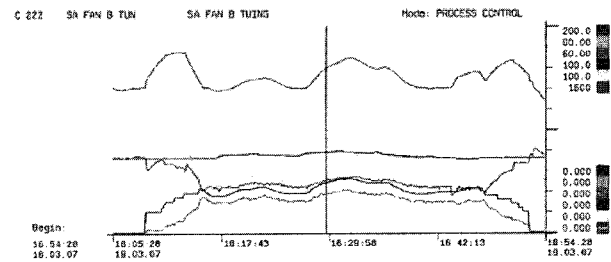


그림 15 SAF-A 베인 & SAF-B 인버터 (비간섭 PI Mode)
Fig. 15 SAF-A Vane & SAF-B VFD at Independent PI Mode

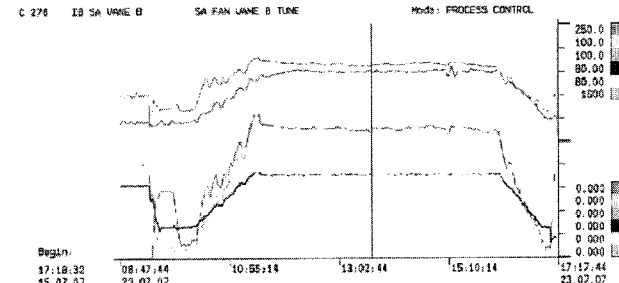


그림 16 발전기 전부하 운전시 베인-인버터 풍량 제어 파형 (비간섭 PI Mode)
Fig. 16 SAF-A Vane & SAF-B VFD Trend at Generator Full Load (Independent PI Mode)

현장적용 대상발전소는 발전기 출력 150MW 이상에서 풍량의 증가에 따라 단독 운전 하던 SAF를 1대 더 기동하여 2대가 병렬운전하게 되어 있었다. 이때 기존 2대의 Vane 병렬운전은 물리적인 특성, 즉 팬 속도에 따른 압력이 같기 때문에 별다른 문제점이 없었으나, 정속운전과 가변속운전이 혼재하여 운전되는 Vane-인버터 병렬운전은 각각의 출구 압력이 달라서 제어하기 쉽지 않았다. 현장 적용시 문제점을 최소화 하기 위하여 본 논문에서 시험한 2가지 모드(부하추종모드, 비간섭 독립 PI 모드)의 보일러 SAF 제어 로직을 수정한 후에 병렬운전 시험을 실시하였다.

그림 14는 부하 추종 모드(Load Track Mode)에서의 실험 결과이다. 발전기 출력 140MW 이상에서 인버터와 배인 병렬 운전 시, 발전기 출력에 추종하는 부하추종 모드에서는 보일러 노내 압력의 변동에 따라 민감하게 반응함을 알 수 있다. 그림 15는 비간섭 독립 PI 모드의 실험 결과이다. 시험을 통하여 배인과 인버터의 PI 제어를 별도로 둔 비간섭 독립 PI 모드에서는 비교적 안정적인 제어 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 그림 16은 발전기 전부하(발전기 140~200MW 출력 증/감발) 운전시험 결과로 Vane-인버터 비간섭 독립 PI 모드에서의 풍량제어를 나타내고 있다.

9. 결 론

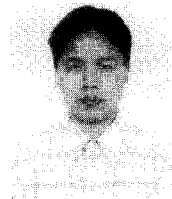
인버터 적용대상 발전소는 발전기 출력에 따라 보일러 내의 유동매체와 석탄의 비가 변화하고 보일러 노내 압력은 시시각각 변화하는 국내 최대의 순환 유동층 보일러를 사용하고 있다. 또한 유동층 형성의 어려움 때문에 정비계획예방정비기간 전에는 거의 발전기를 정지하는 일이 없었다. 따라서 현장 적용시에 문제가 생기면 1년이상 시운전이 늦어지기 때문에 많은 어려움이 있었다. 그리고 국산 고전압 H-Bridge 인버터가 발전소에 최초로 적용되기 때문에 각종 환경시험 및 모의 부하시험을 충분히 실시하여 신뢰성을 확인하였다. 특히 기존의 이차 공기 제어 방식에서와 같이 하나의 PI 로직 모듈로 물리적인 특성이 다른 배인과 인버터를 동시에 제어할 경우, 배출압 차이에 의하여 불안정한 특성이 나타남을 확인 하였다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 다양한 로직에 대한 시험을 모의 실시하여 최종 타당한 2가지 모드에 대한 시험을 실시하였으며, 그 결과 인버터의 PI 제어를 별도로 하는 비간섭 독립 PI 모드의 특성이 가장 우수함을 확인하

였다. 현재 대상발전소의 1, 2호기에 적용된 SAF용 인버터는 상업 운전 중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김수열, 류홍우, "단위 인버터 병렬 운전에 의한 발전소 해수펌프 적용", *전력전자학회 논문지*, pp. 285-289, 1997. 7.
- [2] 한국화학공학회, "에너지공학", pp. 155-157, 1996. 8.
- [3] 류호선 외 1인, "동해화력 순환 유동층 보일러 이차공기 송풍기용 H-브릿지 멀티레벨 인버터 현장적용", *전력전자학회 논문지*, pp. 259-264, 2007.
- [4] 박영민 외 4인, "3,300V, 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터 개발", *전력전자학회 논문지*, pp. 478-487, 2003. 12.

저 자 소 개



김봉석(金奉奭)

1974년 4월 3일생. 2001년 광운대 전기공학과 졸업. 2003년 포항공대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2003년 1월~12월 엘지전자 DA연구소 일반연구원. 2004년 1월~현재 전력연구원 일반연구원.



류호선(柳皓善)

1970년 7월 21일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 전력연구원 선임연구원.