

Weak Feed 전력계통의 블랙스타트와 고조파 공진 사례연구

A Case Study of Harmonic Resonance & Black Start in Weak Feed Power System

박 영 철* · 이 은 섭** · 손 효 수*** · 이 석 현†
(Young-Chul Park · Eun-Seob Lee · Hyo-Soo Son · Seok-Hyun Lee)

Abstract - In order to recover the power system during the wide power outage or power failure in the power plant, black start system should be properly operated without any problem. Especially power for black start in the geographically isolated areas of electric island is supplied from small emergency start-up generator, and loads are aux systems of gas turbines such as SFC(Static frequency converter). This paper introduces the international practices to overcome the voltage drop problem with harmonics of the system having the DC output such as SFC during black start in weak feed system and analyzes the relationship between house load inputs and harmonics. By varying the house load and input of power supply, this paper identified boundaries between weak feed and strong feed power. In order to verify the theory of stable condition in weak feed power system with DC output, house load is simulated using ETAP. Additionally MATLAB was used for harmonic analysis between the load inertia moment and non load inertia moment.

Key Words : Weak feed power, Black start, Inertia moment, House load, Harmonic resonance, THD

1. 서 론

전 계통 정전이나 광역 정전시 발전플랜트 및 시 송전계통을 정해진 절차에 따라 시스템 운영자와 긴밀한 협조 하에 복구하는 절차를 블랙스타트(Black Start)라 한다. 정전이 발생할 경우의 복구는 외부의 건전한 계통으로 전기를 공급받아 복구하는 방법과 외부의 전력공급 없이 자체 기동전원을 이용하여 복구하는 방법 등이 있다. 시송전 선로의 가압은 고조파 공진에 기인한 이상 전압과 선로 과전압 문제를 내포하고 있어 이에 대한 연구가 국내에서 이루어지고 있다[1]. 이에 비해 발전플랜트의 자체기동발전기를 이용한 블랙스타트에 대한 연구는 광역정전사태가 적고 외부의 강력한 전력망을 이용하여 기동함에 따라 이상전압에 대한 발생사태가 적어 연구사태가 비교적 미미한 상황이다. 특히 지리적으로 독립된 지역에서의 블랙스타트는 규모가 작은 자체기동용 비상 발전기가 주요 공급전원으로서 Weak Feed power에 대한 고려가 필요하다.

본 논문은 지리적으로 독립된 지역에서의 Weak Feed power

를 이용한 가스터빈 발전소의 블랙스타트시 문제점을 대상으로 한다. 자체기동이 불가능한 가스터빈 기동을 위해 정지형 주파수변조 기동장치(SFC; Static frequency converter)등이 이용되는데, 전기적으로 독립된 아일랜드(Island) 상태에서 운전시 컨버터로 인한 전압노칭과 고조파 왜형이 발생된다. 이는 컨버터 모선에 연결되어 있는 소내 전력계통의 전자제어카드에 이상전압이 유기되어 전자제어카드손상 등의 부작용이 발생할 수 있다. 따라서 Weak Feed 전력계통에서의 블랙스타트시 소내모선(PCC; Point of common coupling)전압 감소와 고조파 현상은 필수적으로 해결하여야 할 과제다. 계통 안정성 향상관련 컨버터 등 DC출력을 보유한 계통에서는 필터와 리액터 설치 등이 요구된다[2]. 특히 미국전력연구소(EPRI ;Electric Power Research Institute)의 관성모멘트 부하 연계를 통한 안정성 향상이 있다[3].

본 논문은 Weak Feed 전력계통에서 블랙스타트시 고조파와 전압감소 문제가 발생된 해외사례를 소개하고 문제점을 분석하였다. 특히 필터나 리액터 등 설비추가 없이 주어진 조건에서 계통 안정을 위한 방안을 연구하였다. 이를 위해 사례별 등가회로로 모델링하여 소내부하 투입과 고조파의 상관관계에 대한 이론적 근거로 삼았다. 그리고 소내부하 투입과 공급전원 규모를 달리하여 도출된 결과에 대해 Weak Feed와 Strong Feed power의 한계를 규명하였다. 또한 관성모멘트 부하와 비관성모멘트 부하간의 고조파 관계성을 분석하였다.

소내부하 투입량 및 전원공급규모와 고조파간의 상관관계 분석을 위해 ETAP 시뮬레이션을 이용하였으며, 관성모멘트 부하와 비관성모멘트 부하간의 고조파 영향성 분석관련 ETAP 및 추가로 MATLAB을 이용하여 검증하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea

E-mail : plasma@inha.ac.kr

* General Manager, Dept. of Business Development, Korea Southern Power Co., LTD., Korea

** General Manager, Dept. of Instrumentation & control, Korea Southern Power Co., LTD., Korea

*** Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea

Received : March 19, 2015; Accepted : November 26, 2015

2. 발전플랜트에서의 블랙스타트 이해

2.1 조건 및 특성

블랙스타트 조건은 발주자의 요구에 따라 상이하나 기본적으로 Power Block내 전 계통이 정전상태 즉 Black Out 상태이며, 외부로부터의 전력공급 없이 자체발전기(Diesel Generator)를 이용하여 기동하여야 한다. 본 논문에서는 자체발전기의 용량이 10MW(2.5MW/대×4대)로서 이를 이용하여 가스터빈 발전기(235MW/대)를 기동하며, 계통에 전력을 생산하는 것으로 전제하였다. 이 경우 기동장치 등이 연결된 모선전압의 고조파 함유량은 7.5% (THD; Total Harmonic distortion) 내로 유지되어야 하고 전압변동률은 ±10%이내가 되어야 한다.

2.2 블랙스타트 절차

본 논문에서 소개하는 블랙스타트의 발전기 기동은 가스터빈 발전기를 대상으로 한다. 가스터빈발전기의 안정적 기동을 위해 보조기기 계통(BOP ; Balance of Plant)과 유탄계통이 원활하게 운전되고 있어야 한다. 보조기기 계통(BOP) 디젤발전기에서 공급된 전력으로 기동하며, 이는 자동플랜트기동정지시스템(APS ; Automatic plant start up & shut down system)을 통해 자동으로 이루어진다. 보조계통의 기동이 완료되면, 가스터빈의 회전을 위해 가스터빈과 동일한 축에 연결된 발전기에 전원이 인가되어 동기전동기화 되도록 한다. 이는 정지형 주파수변조 기동장치(SFC)에 의하며, 가스터빈-발전기 속도를 상승시켜 가스터빈이 점화할 수 있는 속도에 이르도록 제어한다. 가스터빈은 점화후 가속되어 동기속도에 이르고, 이후 발전전력은 전력계통과 동기검정기를 통해 동기차단기로서 계통에 병입된다. 이로써 블랙스타트 절차는 종료된다. 그림 1은 블랙스타트 관련 계통도를 나타내며, 그림 2는 블랙스타트를 흐름도로서 도식화 한 것이다.

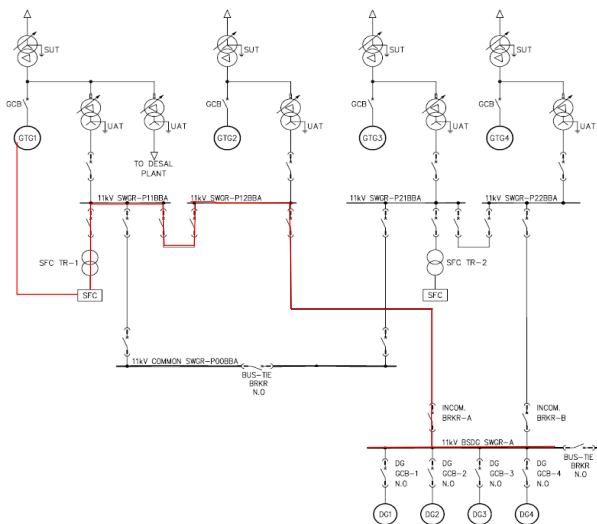


그림 1 블랙스타트 전력계통 단선도
Fig. 1 Single Line Diagram for Black Start up Test

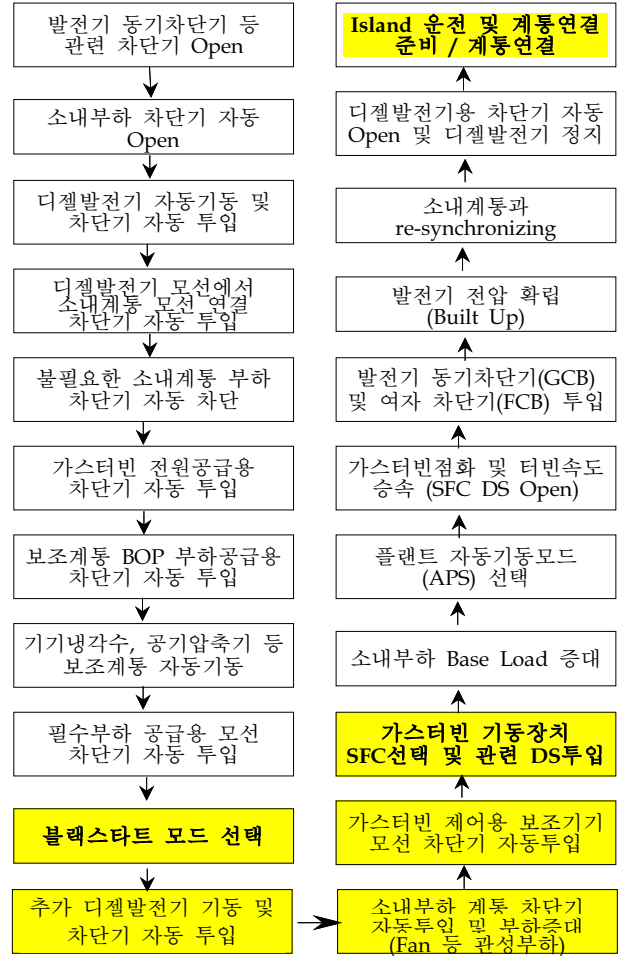


그림 2 블랙스타트 흐름도
Fig. 2 Flow Chart for Black Start up

2.3 정지형 주파수변조 기동장치(SFC ; Static Frequency Converter)

가스터빈기동장치는 SFC와 LCI(Load Commutated Inverter) 등이 있으며, 기능이 유사하므로 SFC로 통일한다. SFC는 가스터빈과 동일 축에 연결된 발전기를 일정속도까지 상승시켜 가스터빈의 점화와 속도상승을 할 수 있도록 하는 소프트스타트 기능을 한다. 가스터빈 속도가 상승되어 자력으로 운전되는 속도에 이르면 SFC는 정지되어 계통에서 분리된다. 아래 그림 3은 SFC 계통의 기본적인 운전개념도이다.

SFC는 컨버터의 입력 정격전압에 맞추기 위해 소내전압을 강하시킬 목적으로 변압기를 사용한다. 컨버터는 AC 교류전력을 DC 직류전력으로 변환하는 기능을 하는데 직류는 리플을 보유하므로 DC전류를 평활하기 위해 DC리액터가 사용된다. 인버터는 직류를 교류로 전환하며 발전기에 전력을 공급하며, 발전기에 공급된 교류전력으로 발전기는 초기 속도를 상승시키는 구간에 역으로 전기를 받아 기동하는 동안 동기전동기로서의 역할을 수행한다. SFC 제어 판넬은 컨버터와 인버터를 제어하고 모든 신호

를 감시하는 기능을 수행한다. SFC는 주파수를 변조하고 계통주파수를 가변주파수로 변조하며, 가장 낮은 주파수(약 3rpm 정도)에서 중간대역 주파수(약 33.3Hz)까지 주파수를 변조한다.

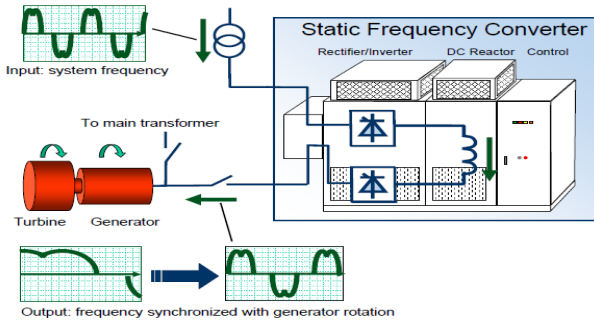


그림 3 SFC 구성도
Fig. 3 SFC System Configuration

3. 블랙스타트 시험 사례분석

3.1 SFC 경부하 시험

블랙스타트를 위해 가스터빈 기동장치인 SFC의 기능은 정상화되어 있어야 한다. SFC의 경부하 시험(Light Load Test)은 일부하 운전에 대비하여 사전에 기능 확인을 위한 과정이다. 이는 SFC 컨버터 출력단에 충분한 전류용량의 동선 또는 동바를 아래 그림 4와 같이 단락하여 시행한다. 시험조건은 현장상황에 따라 상이하나, 단계별 응동 시험으로서 전압변동을 등이 기준치 이내 유지여부를 확인한다. 아래는 경부하 시험조건과 상황을 나타낸다.

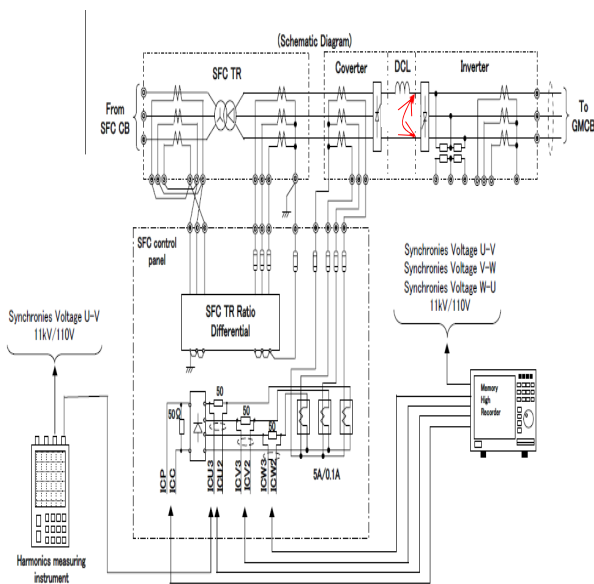


그림 4 SFC Light Load Test 구성도
Fig. 4 Light Load Test Scheme of SFC

- ① 비상발전기(DG 2.4MW/1대) 4대 전원공급
- ② 소내부하(House Load) 약 1,300[kW], 68[A]
- ③ SFC 약 3,000[kW] 155[A]@ Fundamental Frequency
- ④ 시험방법 : 컨버터 출력 DC전류 10~40% 증감, 전류 setting 100%(DC875A), 직류출력전압 0V, 지연각 α 약 90도.

SFC 경부하 시험 진행 중 컨버터 부하를 100%까지 상승시킨 결과 고조파 종합 왜형율(THD)이 29.48%까지 증가되어 소내모선에 연결된 전원공급카드 등 전자카드 일부가 손상되었다.

일반적으로 SCR 3상 전파정류회로에서 SCR 게이트 Turn-off시 3, 5, 7차수 등의 고조파가 발생되며, 이는 PPT 2차(Δ) 권선을 환류하게 된다. 이를 감쇄시킬 목적으로 스너버 및 라인필터가 취부 되나, 콘덴서의 열화 또는 회로 접촉불량, 계통 특성에 의한 SCR 점호각 불완전 등 여러 가지 원인에 의해 고조파의 크기 및 함유율이 증가된다. 아래 표 1 및 그림 5는 시험결과 고조파 왜형율을 나타낸다.

표 1 SFC 경부하 시험 고조파 전압 왜형율

Table 1 SFC Harmonic Voltage Distortion at light Load test

SFC Output Current	5th	7th	11th	13th	17th	19th	23th	25th	29th	31th	THD
50%	5.5	3.5	5.2	4.3	6.8	8.3	4.1	8.2	3.8	2.8	17.7
100%	9.3	7.8	8.5	8.3	11.3	13.9	7.2	12.8	4.7	3.1	29.5

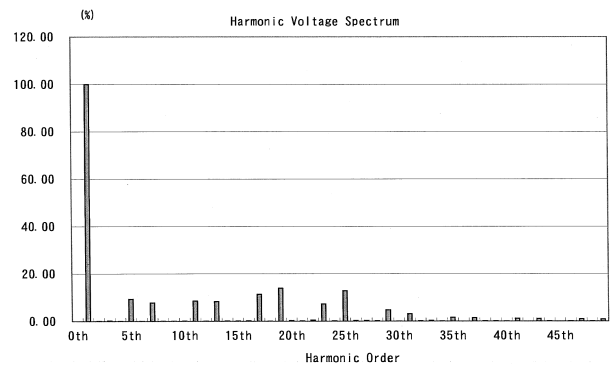


그림 5 고조파 차수별 그래프
Fig. 5 SFC Harmonic Voltage Distortion

일반적으로 고조파 차수가 증가될수록 함유율은 감소하며 에너지도 적어야 하나, 상기 표 1과 그림 5는 기본적인 특성과 상이하게 19차수, 25차수 등에서 함유율이 오히려 증가함에 따라 다음과 같이 분석된다. 디젤발전기의 소내부하 용량이 충분히 확보되지 않은 상태에서 Weak Feed System [68A]로, SFC부하가 155[A]를 소모함에 따라 디젤발전기 모선계통의 전압난조가 발생된 것으로 보인다.

블랙스타트 조건을 충족하기 위해 계통으로부터 격리된 상태

에서 SFC의 기동이 가능해야 하나, 사례에서와 같이 운전되고 있는 기본부하가 1,300KW로서 소규모 용량에 따라 디젤발전기의 동기화력¹⁾이 충분히 발휘되지 못하는 상태이다. 또한 그림 6과 같이 노칭전압²⁾에 의한 간헐적인 영점교차현상으로 계측기가 주파수를 잘못 읽어 짝수파로 인식한 것으로 보이며, 따라서 계측기가 실제보다 높은 THD 값을 읽어드린 것으로 판단된다.

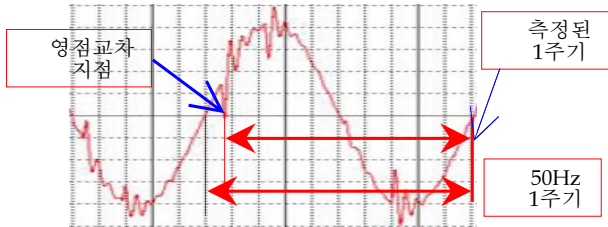


그림 6 영점 교차 현상 분석
Fig. 6 Analysis Zero Crossing Symptoms

3.2 가스터빈 무부하 회전시험 (Spinning Test)

가스터빈의 무부하 회전시험(Spinning Test)은 SFC 부하시험의 일종으로 가스터빈 제어시스템을 통해 터빈-발전기에 직접 부하를 인가하여 속도를 상승시키는 시험을 말한다. 이는 일련의 블랙스타트 과정이며 실제 SFC의 부하운전과 동일하다. SFC 컨버터의 2차 DC전압은 4kV이며, 지연각 α 는 약 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 이다. 무부하 회전시험에서 SFC의 출력전류는 가스터빈이 정해진 속도까지 상승시킬 수 있도록 제어하는 것이 특징이다. 시험 조건은 아래와 같다.

- ① 2차 전류 세팅 : 46% (DC 403A)
- ② DC 출력전압 : DC 4.0kV
- ③ 알파각 (지연각도) : 약 35°
- ④ 기본 소내부하 : 5,400kVA
- ⑤ 공급전원 : DG 4대 운전(10MW)

가스터빈 무부하 회전시험에서 소내부하의 규모는 주어진 전원공급(10MW) 범위 내에서 SFC 소비전력을 제외한 나머지 부하를 최대한 공급하기 위해 5,400kVA로 정하였다. 가스터빈을 기동하기 위해 필수적으로 요구되는 보조설비를 기준으로 부하를 산정하고 그 나머지는 관성모멘트가 있는 팬 종류 부하를 기동하여 순간적인 전압저하에 대비하였다. 시험 중 표 2와 같이 THD 값이 상승되어 노이즈에 의한 설비보호를 고려하여 SFC 출력 46%에서 중단하였다.

- 1) 동기발전기의 기계적 입력과 회전자 위치각 δ 이 평형상태에서 δ 증가 시 발전기 전기적 출력 P가 증가되어 회전체의 누적에너지를 방출함으로 회전체가 가속한다. 이와 같이 동기운전을 위해 $dP/d\delta > 0$ 이어야 하며 이를 동기화력이라 한다.
- 2) Notching Voltage : 전력용반도체소자의 게이트를 Turn-On/Off 순간에 발생하는 전압의 변동

표 2 SFC 46% Spinning Test시 THD값

Table 2 THD Value at 46% SFC Output Current

SFC Output Current	5th	7th	11th	13th	19th	21th	22th	25th	29th	31th	THD
46%	2.3	1.8	1.1	1.4	2.3	3.5	3.9	2.3	1.5	1.5	11.8

이러한 결과를 토대로 분석결과 주어진 Weak Feed Power하에서의 소내부하 증가를 통한 THD 저감에 일부 한계가 있음을 확인하였으며, 효과적인 THD 저감을 위해 고조파 필터 설치 등의 추가적인 대책마련이 요구되었다.

표 3 경부하 시험과 무부하 회전시험 THD값 비교표

Table 3 THD Value at Light Load Test & Spin Test

SFC Output Current	House load (kVA)	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	THD
경부하 (50%)	1,300	5.5	3.5	5.2	4.3	6.8	8.3	4.1	8.2	3.8	2.8	17.7
Spin 시험 (46%)	5,400	2.3	1.8	1.1	1.4	2.3	3.5	3.9	2.3	1.5	1.5	11.8

상기 표 3은 경부하 시험과 가스터빈 무부하 회전시험의 두 시험을 비교한 데이터로서 소내부하 증가에 대한 THD값의 변화를 확인 할 수 있다. 즉 SFC 부하가 유사(46~50%) 한 상태에서 소내부하를 증가시킬 경우 (1,300kVA \Rightarrow 5,400kVA) THD값이 17.7% \rightarrow 11.8%로 감소되었음을 확인할 수 있다.

4. 모의 실험

4.1 소내부하 투입에 따른 PCC 전압계산 (등가도 이용)

소내부하 투입과 모선전압(PCC; Point of Common Coupling) 영향성 분석을 위해 블랙스타트 계통의 등가회로를 이용하였다. Weak Feed 계통에서 노칭 전압에 대한 소내 모선전압 안정성을 등가회로를 통해 이론적으로 계산하였다. 노칭 전압이란 정류 간격차이로 교류회로에서 순간적인 단락과 이로 인한 컨버터에 공급되는 전압이 급강하하는 현상으로, 정류기간 동안 AC/DC 컨버터에서 스위치의 동시도동이 스위칭 소자를 통해 2상을 단락시킴으로써 전압상실과 전압파형이 교란된다.

노칭 전압 분석을 위해 부하와 공급전원 용량을 변경시키면서 모선전압 상태를 아래와 같이 유도하였다. 모선전압의 전압기준은 11.5kV이며, 비상발전기 4대가 운전하는 조건으로 구성하였다.

- ① SFC 부하는 변압기 용량의 4,700kVA기준 100%~5%
- ② 소내부하는 경부하 시험을 기본으로 5~ 10MVA
- ③ 부하 및 SFC 전류 $I = P / \sqrt{3}V$ (1)

- ④ 부하 및 SFC 임피던스(Z) = V^2/P (2)
(소내부하 및 SFC 부하)
- ⑤ 총 임피던스(Z)
(소내부하 $Z \times$ SFC Z) / (소내부하 $Z +$ SFC Z) (3)
- ⑥ 소내모선(PCC) 전압
(정격전압 $11.5kV \times$ 총 Z) / 소내부하 Z (4)

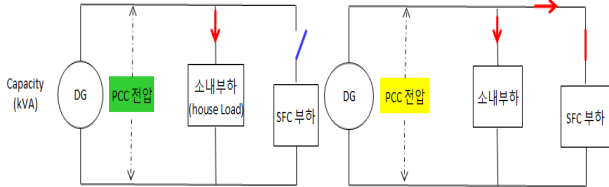


그림 7 블랙스타시 노칭전압 계산을 위한 등가도
Fig. 7 Circuit of Notching Voltage Calculation for Black Start

위 등가회로도를 기준으로 SFC 부하 및 소내부하 조건을 변경하여 계산을 유도하였다. 아래 그림 8은 SFC 부하 40%에서 소내부하를 1,300kVA ~ 10,000kVA까지 증가시킨 등가회로도이다.

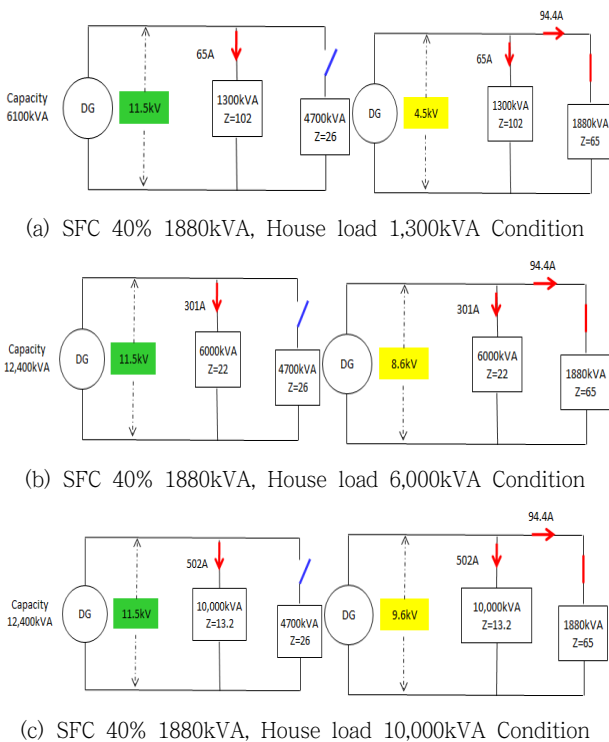


그림 8 SFC 40%시 소내부하별 조건에 따른 PCC 전압
Fig. 8 PCC Voltage at 40% SFC output Current

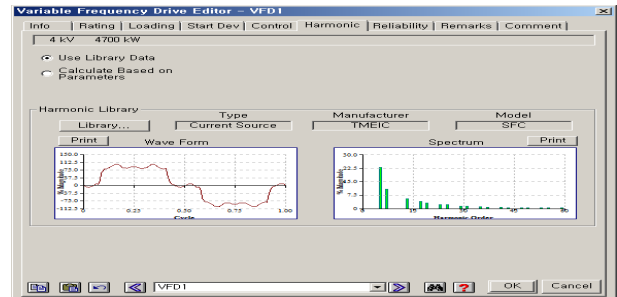
위 그림 8에서와 같이 소내부하 증가에 비례하여 SFC에서의 노칭 전압 Drop율의 감소로 소내전압이 안정적으로 유지되는 것을 등가회로도로서 확인할 수 있다. 블랙스타트를 위해 고조파

부하인 SFC를 기동할 경우 공급전원 용량과 소내부하가 증대될 수록 안정적인 소내 모선전압이 유지될 수 있음을 이론적으로 확인할 수 있다.

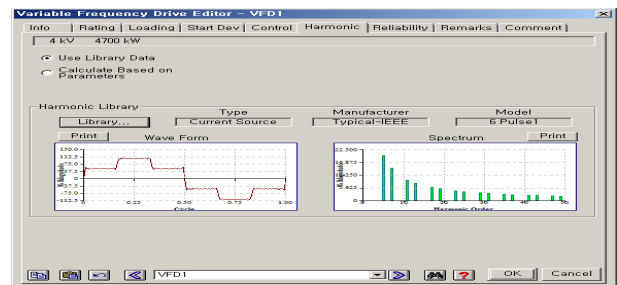
4.2 SFC 경부하 시험 모의실험

본 논문에서는 Weak Feed 계통(소규모 전원공급체계)에서 블랙스타트시 고조파 함유 대용량 전력기기 기동에 따른 고조파 저감연구를 위해 ETAP 시뮬레이션을 활용하였다. 첫째로 블랙스타트를 위한 SFC 경부하 시험시 발생된 고조파와 관련하여 시뮬레이션을 통해 실제값과 비교하였다. 그리고 관성부하와 비관성 부하투입에 대한 고조파 영향성을 ETAP과 MATLAB 시뮬레이션의 두 가지 방법으로 결과에 대한 검증은 시도하였다. 그리고 이론적으로 검증된 소내부하 증가에 대한 고조파 변화량을 분석하였다. Weak Feed에 대한 정의를 규명하기 위해 IEC에서 정한 일정한 고조파 기준으로 소내부하와 전력공급량을 가감하여 일정한 규칙을 확인하였다.

마지막으로 고조파 제거목적으로 실제 적용된 필터를 기준으로 소내부하 적용전과 후로 구분하여 모의 실험하였다. 그림 9는 모의실험을 위한 라이브러리 값과 6 펄스 컨버터의 기본적인 고조파 값을 입력한 것이다.



(a) ETAP Library Data



(b) 고조파 전류 입력파형

그림 9 시뮬레이션 입력 데이터

Fig. 9 Simulation input Data

모의실험은 아래와 같이 SFC의 부하를 단계적으로 상승시켜 100%까지 증가시킨 후 결과를 도출하였다.

4.2.1 SFC 50% : THD 13.34%

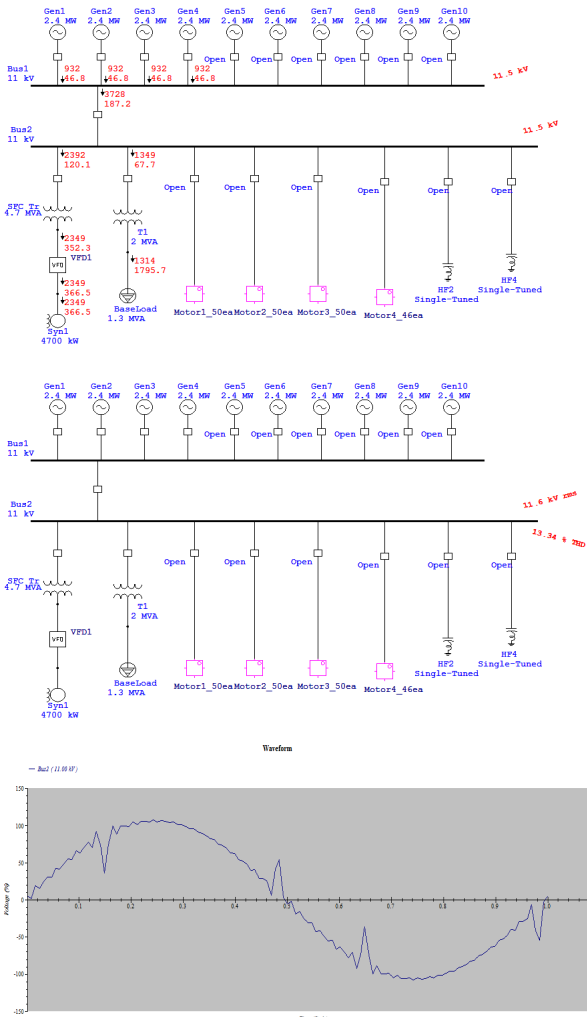


그림 10 SFC 50%, 소내부하 최소 1,300kVA 파형
Fig. 10 Wave for SFC 50%, Min hose Load 1,300kVA

4.2.2 SFC 100% : THD 26.67%

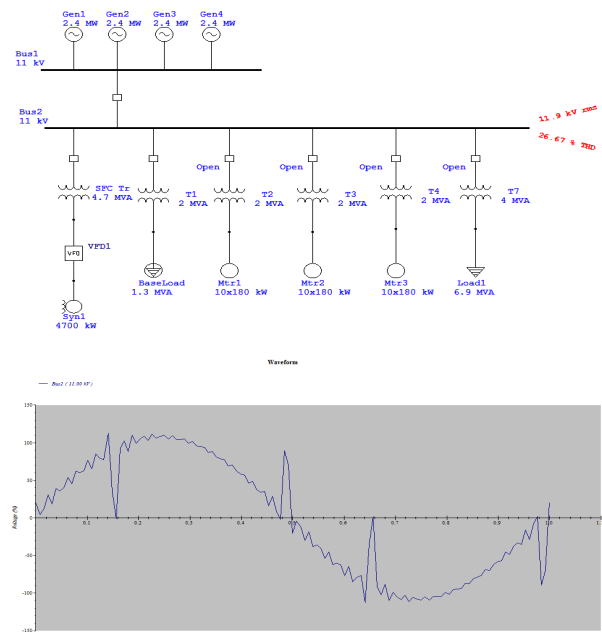
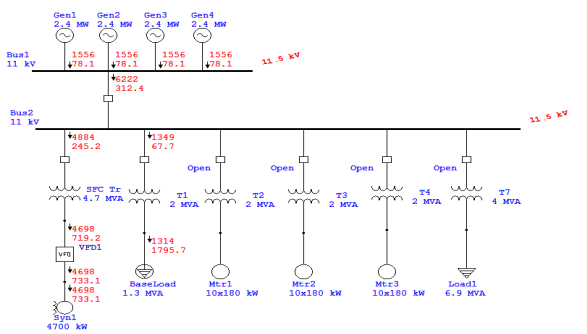


그림 11 SFC 100%, 소내부하 최소 1,300kVA 파형
Fig. 11 Wave for SFC 100%, Min hose Load 1,300kVA

상기 그림 10, 11은 SFC 부하증가에 비례하여 THD가 증가됨을 보여준다. 아래 표 4는 실제의 경부하 시험과 모의실험간의 비교표로서 Δ THD값이 2~4%로서, 이는 실제 부하 구성요소이지만 고조파 유발 기기(배터리 충전기 등)를 모두 적용치 않은데 기인한 것으로 그 차이가 크지 않아 모의실험에 문제없는 것으로 확인되었다.

표 4 경부하 시험과 시뮬레이션 THD값 비교표
Table 4 THD Value at Light Load Test & Simulation

SFC Load	THD (%)		Δ THD
	(경부하 시험) Light Load Test	(모의실험) Simulation	
50%	17.7	13.34	4.36
100%	29.5	26.67	2.83

4.3 소내부하 투입에 따른 THD 변화실험

소내전압의 THD 값을 국제전기기술위원회(IEC)에서 권고하는 8%로 일정하게 유지하기 위해 SFC 부하별로 소내부하 투입량을 변화시켜 아래와 같이 시뮬레이션 하였다[4].

4.3.1 SFC 40%, 공급전원 10MVA, 소내부하 7.7MVA

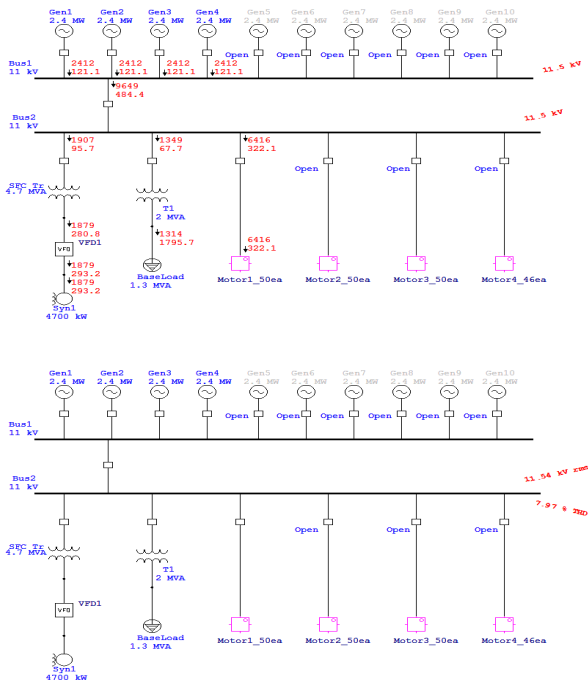


그림 12 SFC 40%, 발전기4대 10MVA, 소내부하 7.7MVA 고조파
Fig. 12 SFC40%, Gen 10MVA, THD for hose Load 7.7MVA

4.3.2 SFC 90%, 공급전원 22.5MVA, 소내부하 18.3MVA

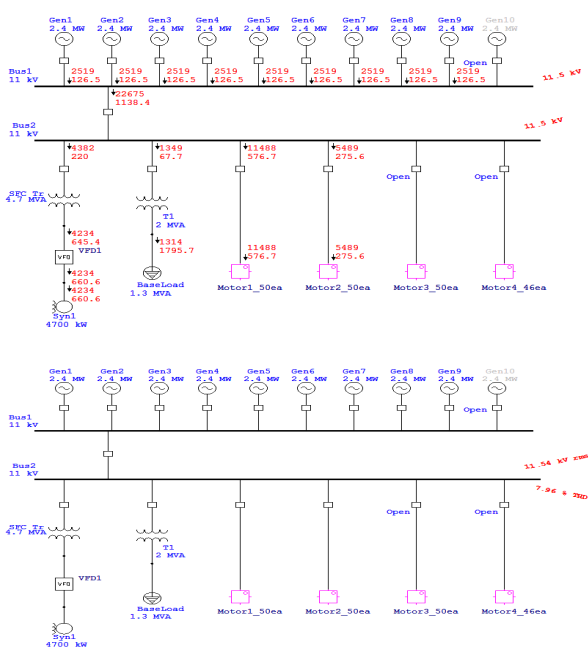


그림 13 SFC 90%, 발전기 9대 22.5MVA, 소내부하 18.3MVA 고조파
Fig. 13 SFC90%, Gen22.5MVA, THD for hose Load 18.3MVA

상기 모의실험 결과를 정리하면 아래 표 5와 같다.

표 5 THD 8% 유지관련 SFC 부하별 소내부하 비율
Table 5 Generation Capacity & house Load Rate as SFC Load for maintaining below THD 8%

Generator (kVA)	GEN 대수	SFC Load (%)	SFC 출력 (kVA)	소내 부하 (kVA)	소내 부하/DC출력	DC출력/소내부하 (%)	공급능력/DC출력	DC출력/공급능력 (%)
25000	10	100	4698	20138	4.29	23.33	5.32	18.79
22500	9	90	4234	18291	4.32	23.15	5.31	18.82
20000	8	80	3764	16222	4.31	23.20	5.31	18.82
17500	7	70	3294	13925	4.23	23.66	5.31	18.82
15000	6	60	2824	11857	4.20	23.82	5.31	18.83
12500	5	50	2349	9793	4.17	23.99	5.32	18.79
10000	4	40	1879	7730	4.11	24.31	5.32	18.79

(a) THD 8% 유지를 위한 소내부하 및 공급능력 비율표

SFC 부하율 (%)	SFC 출력 (kVA)	부하 1.3MW 발전기 4대 운전시 THD(%)	THD 8%로 운전하기 위한 발전기 대수 및 소내부하 조건
10	470	2.67	-
20	940	5.53	-
30	1404	7.97	-
40	1879	10.67	발전기 4대, 부하 7.8MVA (6.4MW)
50	2349	13.34	발전기 5대, 부하 9.8MVA (8.3MW)
60	2824	16.03	발전기 6대, 부하 11.8MVA (10MW)
70	3294	18.7	발전기 7대, 부하 14.0MVA (11.8MW)
80	3764	21.37	발전기 8대, 부하 16.3MVA (13.7MW)
90	4234	24.03	발전기 9대, 부하 18.3MVA (15.4MW)

(b) SFC 부하별 발전기 대수 및 소내부하 증가표

상기 표 5는 Weak Feed Power 상태에서 DC출력에 대한 소내부하 비율이 4.3이상 되어야 규정치 이내의 THD로 운전됨을 보여준다. 역으로 Weak Feed Power의 한계를 벗어나기 위한 공급능력 한계는 DC출력의 5.3배 이상이 되어야 함을 확인할 수 있다. 이를 근거로 Weak Feed 한계는 DC출력에 대한 공급능력 범위가 5.3배 이상이 되어야 하며 이는 Weak Feed와 Strong Feed의 구분을 짓는 한계로 해석될 수 있다.

4.4 관성과 비관성모멘트 부하 실험

DC 출력을 보유한 AC 계통에서의 전압안정성 향상관련 미국

전력연구소(EPRI)의 권고는 아래와 같다[3].

$$H_{dc} = \frac{\text{Total rotational inertia of ac system, MW}\cdot\text{s}}{\text{MW rating of dc link}} \quad (5)$$

상기 식 (5)에서 DC출력을 보유하고 있는 소내계통의 전압안정성 향상을 위해 Hdc값은 적어도 2.0~3.0이 필요함을 적시하고 있다[3]. 따라서 본 실험을 위해 관성부하와 비관성모멘트 부하를 아래와 같이 투입 실험하였다.

4.4.1 SFC Full 부하 (4700kVA), 소내부하 5.4MW (6.9MVA) - 전동기180kW 30대(관성 5.4MW) - THD 21.12%

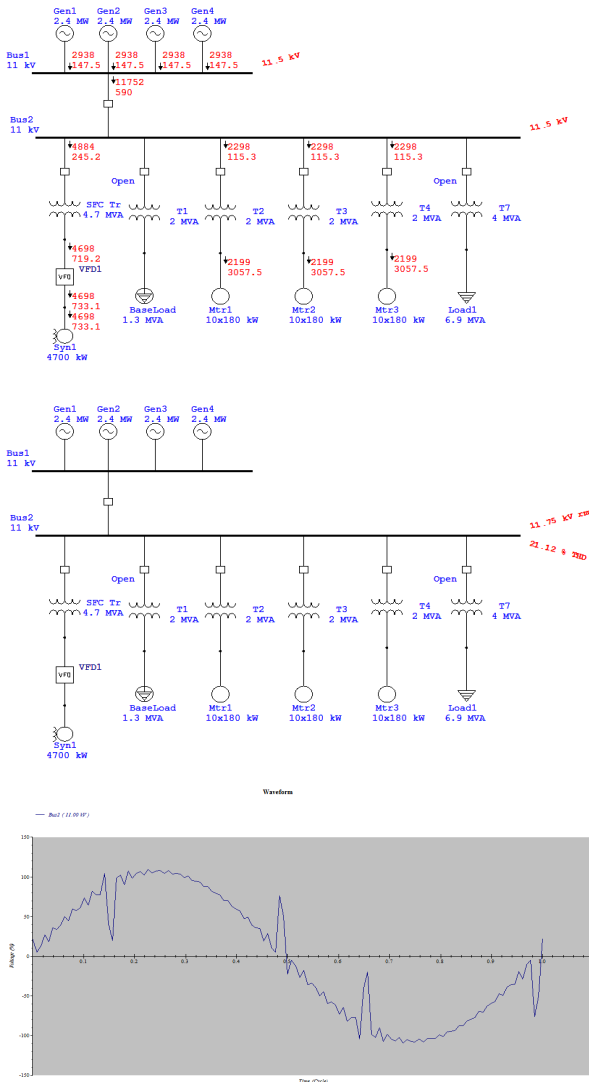


그림 14 SFC 4,698kVA, 소내부하 관성 5.4MVA 파형
Fig. 14 SFC 4,698kVA, Wave for hose Load 5.4MVA(Inertia)

4.4.2 SFC Full 부하(4700kVA), 소내부하 5.4MW(6.9 MVA) - 비전동기(비관성) - THD 20.43%

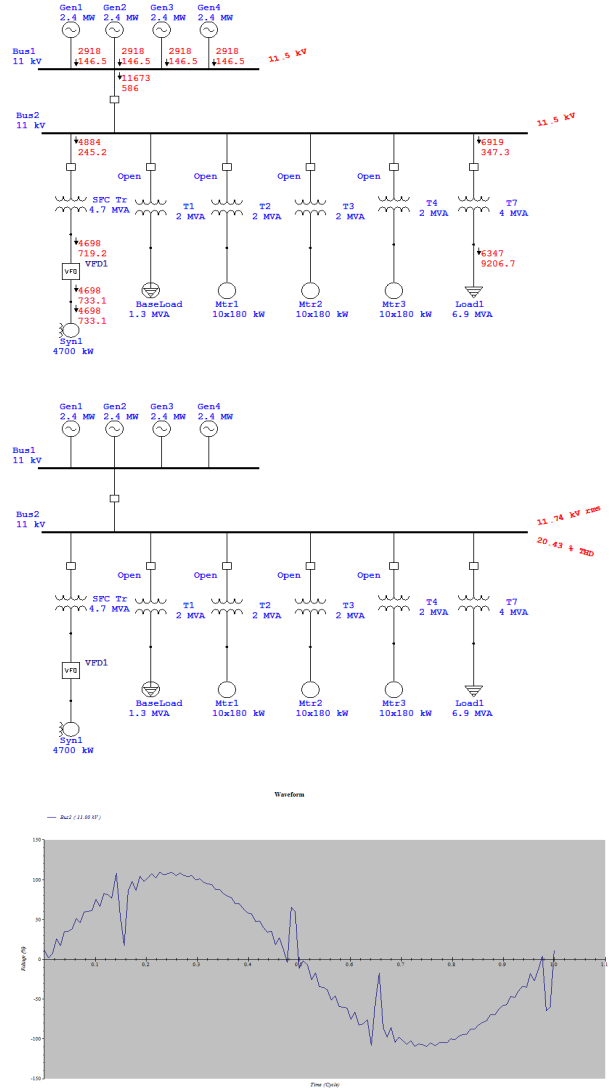


그림 15 SFC 4,698kVA, 소내부하 비관성 5.4MVA 파형
Fig. 15 SFC 4,698kVA, Wave for hose Load 5.4MVA(Non Inertia)

상기 ETAP 모의실험 결과 비 관성 및 관성부하에 대한 고조파 영향성이 미미한 것으로 실험되었다. 적용된 모의실험 프로그램이 관성에 대한 영향성과 고조파 간 상관성에 어떻게 적용되었는지 확인이 곤란하여 재차 유사한 전력분석 프로그램인 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

4.4.3 관성/비관성 부하에 따른 고조파 변화 (MATLAB)

관성부하와 비관성부하간의 고조파 영향에 대한 모의실험을

ETAP 시뮬레이션에 이어 아래와 같이 MATLAB을 통해 진행하였다. 여기에 적용된 발전기와 전동기 특성은 아래 그림 16과 같이 모두 MATLAB 라이브러리를 사용하였으며 동일한 모델로 고조파를 분석하였다.

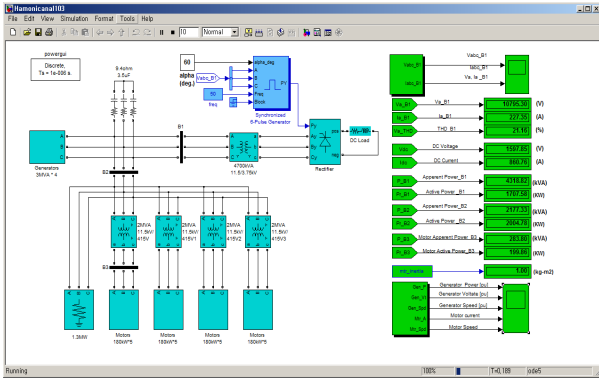


그림 16 MATLAB분석에 사용한 모델

Fig. 16 Modeling for analysis in MATLAB

아래 그림 17은 비관성 부하 적용시의 THD 결과이며 그림 18은 관성부하 적용시의 THD 결과이다. 결과적으로 관성과 비관

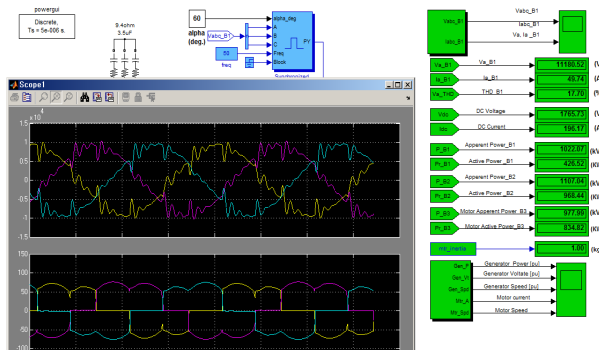


그림 17 Motor 30대 비관성 부하(관성 1kg-m²), THD 17.7%

Fig. 17 Non-Inertia house load, THD 17.7%

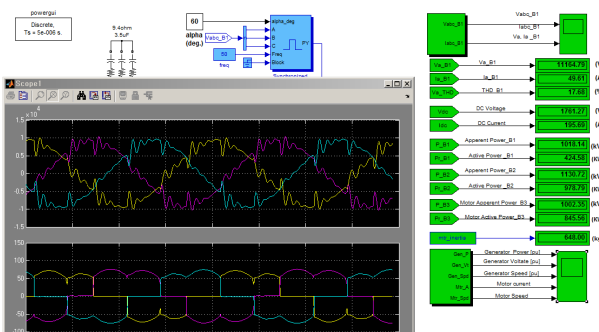


그림 18 Motor 30대 관성부하(관성 648kg-m²), THD 17.68%

Fig. 18 Inertia house load, THD 17.68%

성 부하 적용시 THD 값이 각각 17.7% 및 17.68%로서 거의 유사한 값으로 도출됨에 따라 관성모멘트가 THD에 미치는 영향은 미미한 것으로 확인되었다. 따라서 DC부하에 대한 AC 전압 안정성 향상을 위한 관성모멘트 부하 적용이 고조파에 어떻게 영향을 미치는가에 대하여 지속적인 연구가 필요하 할 것이다.

4.5 고조파 필터와 소내부하 병행실험

고조파 필터는 고조파 공진대책으로 가장 많이 사용하는 방안 중의 하나이다. 아래 표 6은 소내부하량과 필터를 병행할 경우 도출되는 THD에 대한 모의실험 결과를 나타낸다. 그 결과 Weak Feed Power 계통에서 소내부하의 증가를 통해 고조파 함유율이 감소됨을 알 수 있다. 그렇지만 소내부하 증가만으로 완전한 계통안정도 향상은 곤란하며, 고조파 필터와 조합할 경우 효과적인 전압 안정도 향상이 가능함을 확인 할 수 있다.

표 6 소내부하 및 고조파 필터 사용에 따른 THD 값

Table 6 THD Value at house Load Rate & use of Filter

SFC 입력 3558kW 1617kVAr

소내부하	전체부하		필터입력		소내부하			THD
	KW	kVAr	KW	kVAr	KW	kVAr	kVA	
6MW	9508	5429			5950	3812	7066	16.5
(필터)	9512	3731	3	-1698	5951	3812	7067	9.5
5MW	8549	4846			4991	3229	5944	17.4
(필터)	8552	3148	3	-1698	4991	3229	5944	9.8
4MW	7576	4186			4018	2569	4769	18.1
(필터)	7579	2488	3	-1698	4018	2569	4769	10
3MW	6549	3557			2991	1940	3565	19.3
(필터)	6552	1859	3	-1698	2991	1940	3565	10.4
2MW	5577	2896			2019	1279	2390	20.2
(필터)	5580	1198	3	-1698	2019	1279	2390	10.7
1MW	4550	2267			992	650	1186	21.7
(필터)	4553	569	3	-1698	992	650	1186	11.1
0MW	3558	1617			0	0	0	23.6
(필터)	3561	-81	3	-1698	0	0	0	11.8

5. 결 론

본 논문에서는 Weak Feed Power 계통에서 6펄스 컨버터와 같이 고조파 발생이 많은 부하를 이용하여 블랙 스타트시 안정적인 전원계통을 유지하기 위해 소내부하 구성비와 공급전원 용량 한계에 대하여 연구한 결과를 기술하였다. 소내부하 증가에 대한 모션전압 안정성 향상을 이론적으로 계산하였고, 모의실험을 통해 얻어진 결과와 비교하여 소내부하 증가가 노칭전압 감소 등으로 전원계통 안정성 향상에 영향을 주는 것을 확인하였다.

본 논문은 Weak Feed 계통에서의 블랙스타트와 유사한 모델을 ETAP시뮬레이션을 통해 수행하였고 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 6펄스 컨버터와 같이 고조파 함유량이 많은 전력기기를 Weak Feed 계통에서 기동시 주어진 조건에서 최대한 소내부하를 확보하여야 하는 것으로 나타났다.

(2) Weak Feed Power와 Strong Feed Power의 한계는 모의 실험결과 DC출력 기기용량 대비 4.3배 이상의 소내전원이 확보된 경우로 볼 수 있으며, 공급전원은 DC출력 기기용량 대비 5.3배 이상의 발전력이 확보되면 비교적 Strong한 전원으로 나타났다. 따라서 소규모 풍력이나 태양광 같이 전기적으로 격리된 지역에서 대용량의 전력기기를 기동시 이를 적용하여 설계에 반영할 수 있는 기준이 될 것이다.

(3) 본 실험에서 확인하고자 하였던 관성부하와 비관성부하의 고조파 영향성에 대한 실험결과 관성부하에 대해 특별한 변동이 없는 것으로 확인되었다. 이와 관련하여 지속적인 연구가 필요하다 할 것이다.

(4) Weak Feed Power 계통에서 블랙스타트를 위해 대규모 전력기기를 기동하는 과정에서 우선으로 고조파 문제 해결에 역점을 두었다. 그 외에도 SFC의 기동특성 조정과 여자기 특성 보완 등 다각적인 방법을 통해 가스터빈의 안정적 기동을 할 수 있었다.

본 논문을 통해 전기적으로 격리된 지역(도서지역)에서의 Weak Feed Power 계통의 안정적 유지를 위한 하나의 설계 기준으로 활용되기를 희망한다.

감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술진흥원 해양에너지 융복합 인력양성 사업과 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학 사업의 지원을 받아 수행됨.

References

[1] H. J. Lee, K. S. Lee, S. M. Park, "Analysis of Harmonic Resonance during Restoration of Primary Restorative Transmission System", KIEE Summer conference, pp.220-222, 2005.

[2] IEEE recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electric power Systems, IEEE Group, IEEE Standard 519, 1992.

[3] P. Kunder, N. J. Balu, M. G. Lauby, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., pp.528-533, 1994.

[4] IEC 1000-3-6 Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 3: Limits, section 6 : Assessment of emission limits for distorting in MV and HV power systems, Basic EMC publication, 1996

[5] J. Y. Choi, D. J. Won, "Black start and Synchronization of Microgrid Considering Distributed Generation Control", KIIEE, Vol.62, No.7, pp.898-904, 2013.

[6] C. H. Lim, K. S. Lee, W. K. Yu, H. J. Lee, "A Study on the Analysis of Damping Loads Prevent Harmonic Resonance", KIIEE, Vol.59, No.2, pp.262-266, 2010.

[7] R. Ghandehari, A. Shoulaie, "Evaluating Voltage Notch Problems Arising from AC/DC Converter Operation", IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 9, pp. 2111-2119, Sep. 2009.

[8] H. J. Lee, S. M. Park, "Analysis of Reactive Power Capability for Salient Synchronous Generators, and its Application to Primary Restorative Systems", KIEE, Vol.56, No.1, pp.14-17, 2007.

[9] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons, Inc., pp.138-153, 2003.

[10] Su-Mi Lee, Yeong-Han Chun, "Assessment of Optimal Constitution Rate of Windturbine and Photovoltaic Sources for STable Operation of Microgrid", KIEE, Vol.59, No.2, pp.272-276, 2010.

저 자 소 개



박 영 철 (Young-Chul Park)

1966년 2월 28일생. 2000년 경남과학기술대 산업자동화공학 졸업. 2015년 인하대 공학대학원 정보전기공학 석사 졸업. 2015년~현재 한국남부발전(주) 신성장사업실 팀장
E-mail : parkyoch@kospo.co.kr



이 은 섭 (Eun-Seob Lee)

1963년 10월 24일생. 1997년 한려산업대 전자계산공학 졸업. 2009년 한국남부발전(주) 기술전문팀장. 2015년~현재 한국남부발전(주) 신인천본부 계측제어팀장
E-mail : starsilver@kospo.co.kr



손 효 수 (Hyo-Soo Son)

1990년 2월 1일생. 2014년 남서울대 전자공학과 졸업. 2015년~현재 인하대학교 대학원 재학

E-mail : handhs2606@gmail.com



이 석 현 (Seok-Hyun Lee)

1963년 2월 3일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 인하대학교 전기공학과 교수

E-mail : plasma@inha.ac.kr