DR 참여용량에 따른 민감 부하설비의 전력품질 특성에 관한 연구

김경화*,**, 진태환*, 이인준*, 조경철*, 노대석**
*한국섬유기계융합연구원 에너지DX연구부
**한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:khkim@kotmi.re.kr

A Study on the Power Quality Characteristics of Critical Facility According to Demand Response Capacity

Kyung-Hwa Kim*,**, Tae-Hwan Jin*, In-Jun Lee*, Kyung-Chul Jo*,
Dae-Seok Rho**
*Energy DX Research Center, Korea Textile Machinery Convergence Research Institute
**Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 정부의 탄소중립 로드맵과 전력수요 관리 정책에 따라 수요자원 거래제도(DR)는 제조업 등 다양한 산업 분야에서 빠르게 확산되고 있다. 그러나, 공장 내부에서 일반적으로 사용되고 있는 소결로, 정형 프레스 등과 같은 민감 부하설비는 전압 변동이나 순간 정전, 고조파 등과 같은 전력품질 문제에 취약하여, 무분별한 DR 참여로 인해 전원공급에 이상이 생길 경우 생산성과 설비 신뢰성에 악영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 DR제도에 실제 참여하고 있는 제조산업체 수용가의 구성을 제시하고, 이를 바탕으로 구내 배전계통부, 일반 부하설비부, 민감 부하설비부로 구성된 모델링을 수행한다. 여기서, 구내 배전계통부는 수전용 변압기, 구내 배전선로, 분기용 변압기 등으로 구성되고, 일반 부하설비부는 DR 제도에 참여하여 소모 전력을 감소시키는 공조 시스템, 조명설비 등으로 이루어진다. 또한, 민감 부하설비부는 소결로, 정형 프레스 등과 같이 높은 전력품질을 요구하는 제조설비를 상정한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 민감 부하설비의 전력품질 특성을 분석한 결과, DR 참여 지령에 따라 일반 부하설비의 소모 전력이 일시적으로 제한되는 경우, 동일한 구내 배전선로에 연계된 민감 부하설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

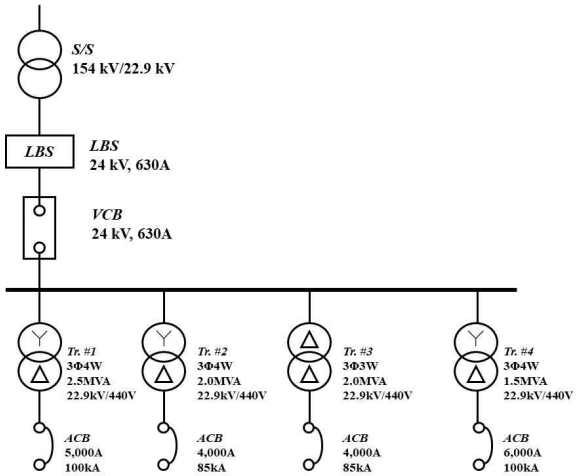
최근, 정부의 탄소중립 로드맵과 전력수요 관리 정책에 따라 수요자원거래제도(DR) 참여는 제조업 등 다양한 산업 분야에서 빠르게 확산되고 있다[1]. 그러나, 공장 내부에서 일반적으로 사용되고 있는 프레스 설비와 같은 민감 부하설비는 전압 변동이나 순간 정전, 고조파, 순간 전압강하와 같은 전력품질 문제에 취약하여, 무분별한 DR 참여로 인해 전원공급에 이상이 생길 경우 생산성과 설비 신뢰성에 악영향을 줄 수 있다. 이에 따라, DR 참여가 민감 부하설비의 전기적 특성에 미치는 영향을 분석하고, 안정적으로 부하를 제어할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DR제도에 실제 참여하고 있는 수용가의 구성을 제시하고, 이를 바탕으로 배전계통부, DR 제도 참여부, 민감부하설비부로 구성된 수용가의 모델링을 수행한다. 여기서, 배전계통부는 배전용 변전소, 배전선로, 배전용 변압기 등으로 구성되고, 민감부하 설비부는 440V를 사용하는 정형 프레스 설비로 상정하며, 일반부하부는 DR 지령에 따라 소모 전력을 감소시키는 일반적인 부하들을 바탕으로 모델링한다. 또한, DR에 참여하는 용량의 크기에 따라, 필요한 경우 생산계획에 영향을 미치지 않는 정도에서 민감부하설비 중 일부의 전원을 차단하여 DR 지령에 대응하는 방식으로 구성한다. 상기에서 제시한 구성 및 모델링을 바탕으로 DR 참여 지령에 따라 일반 부하설비의 소모 전력이 일시적으로 제한되는 경우, 동일한 구내 배전선로에 연계된 민감 부하설비의 전력품질에 미칠 수 있는 영향을 제시한다.

2. DR 참여 수용가의 운용 특성

2.1 DR 참여 수용가의 구성

DR 제도에 참여하는 제조산업체 수용가의 구성은 그림 1과 같이 구내 배전계통부, 민감 부하설비, 일반 부하설비 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, 구내 배전계통부는 수전용 변압기, 구내 배전선로 및 분기용 변압기 등으로 구성된다. 또한, 민감 부하설비부는 소결로, 정형 프레스와 같이 높은 전력품질을 요구하는 부하를 의미하며, 이 설비의 제어기, PLC, 서보모터, 인버터 등은 일반적으로 ±10% 이내의 전원공급 안정도를 요구한다. 또한, 일반 부하설비는 공조시스템, 냉·난방기, 조명, 가공기 등의 평상

적인 전력품질을 요구하는 부하를 의미하며, DR 제도에 참여하는 부하이다. 즉, DR 참여 지령에 따라 이들 부하를 차단하여 목표로 하는 수용가의 사용 전력을 감소시킬 수 있다.



[그림 1] DR제도 참여 수용가의 수배전도

2.2 일반 부하설비

일반 부하설비는 생산 공정의 직접적인 품질 결정 요소는 아니지만, 운영에 필요한 보조 설비로 표 1과 같이 구성된다.조명 설비는 작업자의 시인성 확보 및 작업 안전을 위해 필수적이나, 단기적인 출력 조정이 제품 품질에 미치는 영향은 제한적이다. 따라서 DR 참여 시 비교적 우선적으로 감축 가능한 부하로 분류된다. 전력 감축에 따라 공조 출력이 일시적으로 감소할 경우 작업 환경 쾌적도 저하가 발생할 수 있지만, 일정 범위 내의 온도 변동은 단시간 공정 품질에 직접적인 영향을 미치지 않는 특성을 가진다. 따라서, 본 논문에서는 DR 지령시 우선 감축 대상 부하로 고려하여 DR 참여에 따른 민감부하설비의 영향도 평가를 수행한다.

[표 1] 일반 부하설비의 구성

설비종류	용량[kVA]
유틸리티	488.78
가공기	870.57
기타	444.35
공조기	460.14
전체 용량	2,263.84

2.3 민감 부하설비

민감 부하설비 중 하나인 소결로는 그림 2의 (a)와 같이, 고온 열처리 공정을 통해 소재의 물성을 결정하는 핵심 설비로, 온도 편차에 매우 민감한 특성을 가진다. 특히, 가열 및 유지 구간에서의 전압 강하나 주파수 변동은 내부 온도 균일도에 영향을 미쳐 제품의 밀도 및 기계적 특성 편차를 유발할 수 있다. 또한, DR 참여로 인한 출력 제한 시 히터 제어 응답이 지연될 경우 소결로의 온도제어에 영향을 미칠 가능성이 존재한다. 한편, 정형프레스는 그림 2의 (b)와 같이, 분말 또는 소재를 일정 압력으로 정형하는 설비로, 구동 모터의 토크 안정성과 압력 제어 정밀도가 중요하다. DR 제도에 참여함에 따라 순간적인 전압 변동이 발생할 경우 PLC 및 서보 모터의 응답 특성이 변화하여 성형 압력 오차가 발생할 수 있으며, 제품 치수 정밀도 및 내부 결함 발생률 증가로 이어질 수 있다. 특히, 반복 생산 공정에서는 미세한 전력 품질 저하가 누적되어 공정 불량률 상승 요인이 될 수 있다.

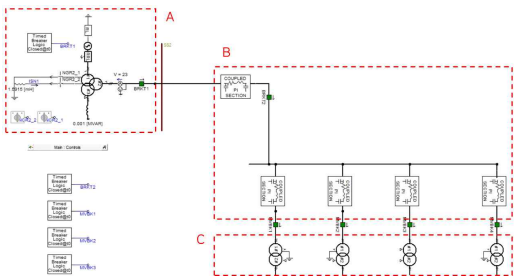
(a) Mesh Belt 타입 소결로 (b) 정형프레스 설비

[그림 2] 민감 부하설비의 구성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 DR 참여 수용가의 모델링

3.1 구내 배전계통부

구내 배전계통부는 그림 3과 같이 수전용 변압기, 구내 배전선로, 분기용 변압기 등으로 구성된다. 여기서, 수전용 변압기는 그림 3의 (A)와 같이, 154kV/22.9kV 변압기로 Y-Y-△, 9.5MVA로 구성되며, 구내 배전선로는 그림 3의 (B)와 같이, FR-CN/CO-W 200mm^{2}의 선종과 4km의 긍장을 상정한다. 또한, 분기용 변압기는 그림 3의 (C)와 같이, 3개의 Y-△ 변압기와 1개의 △-△ 변압기로 구성되며 용량은 각각 2.5[MVA], 2[MVA], 1.5[MVA], 2[MVA]로 적용한다.

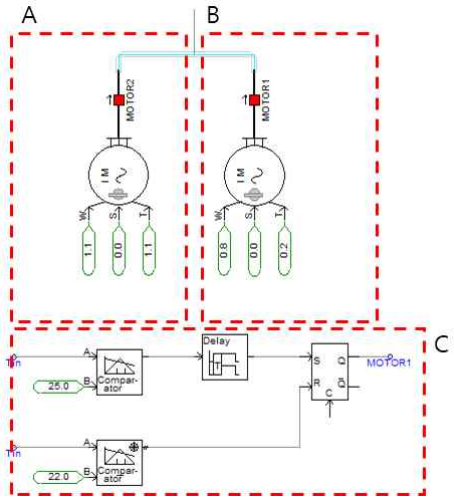


[그림 3] 구내 배전계통부 모델링

3.2 일반 부하설비부

일반 부하설비부는 제조산업 수용가에서 공조 시스템, 조명부하 등을 의미하며, 특히, 공조 시스템, 에어 컴프레셔 등과 같은

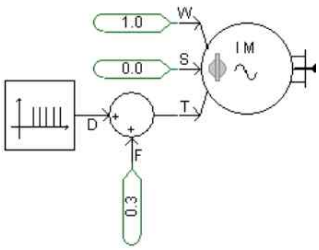
모터 부하로 주로 이루어진다. 따라서, 본 논문에서는 일반 부하설비부를 그림 4와 같이 모델링한다. 여기서, 그림 4의 A는 에어컴프레서, B는 공조기, C는 공조기의 제어부를 각각 나타낸다.



[그림 4] 일반부하설비부 모델링

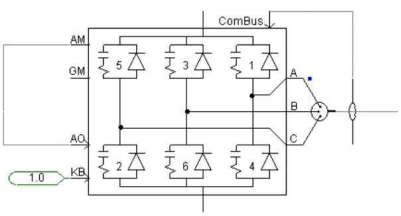
3.3 민감 부하설비부

민감 부하설비부는 정형 프레스와 소결로 등으로 구성되는데, 먼저, 정형 프레스는 그림 5와 같이, PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리의 induction motor를 바탕으로 모델링을 수행한다.



[그림 5] 정형프레스 모델링

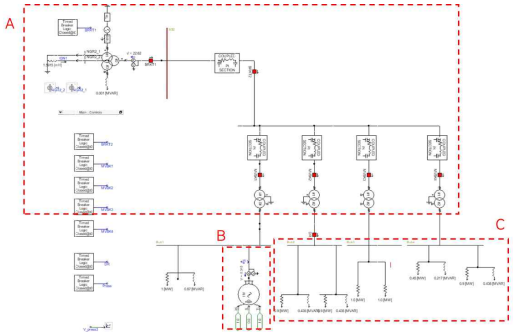
한편, 소결로의 모델링은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 소결로의 모델링은 PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 6상 SCR 브릿지를 바탕으로 모델링한다.



[그림 6] 소결로 모델링

3.4 전체 시스템

PSCAD/EMTDC를 이용하여 민감 부하설비를 포함한 DR참여 수용가의 전체 시스템을 모델링하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, section A는 배전계통부, section B는 민감 부하설비부 section C는 일반부하부로 구성된다.



[그림 7] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

4.1 시뮬레이션 및 시험 조건

DR 참여용량에 따른 민감 부하설비의 영향도를 분석하기위한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DR에 참여하는 수용가의 전체 용량은 5.2[MVA]로 상정하고, 배전선로의 선종, 배전용 변압기의 용량 및 결선 방식 등은 실제 DR 제도에 참여하고 있는 수용가와 동일한 조건으로 상정한다. 또한, DR 참여 용량에 따라 영향도 평가 시나리오를 case 1, case 2, 그리고 case 3으로 분류하여, 각각 1[MVA], 2[MVA]와 3[MVA]의 DR 참여 지령을 수행하고, 이때 민감 부하설비의 전원공급에 미치는 영향을 분석한다.

[표 2] 시뮬레이션 및 시험 조건

항 목		내 용
수용가 전체 용량		5.2[MVA]
수전용 변압기		9.5[MVA](Y-Y-△)
구내 배전선로		FR-CN/CO-W, 200[mm2]
분기용 변압기	Tr #1	2.5[MVA](Y-△)
	Tr #2	2.0[MVA](Y-△)
	Tr #3	2.0[MVA](△-△)
	Tr #4	1.5[MVA](Y-△)
민감 부하설비	정형 프레스	440[Vrms]/400[A]
	소결로	440[Vrms]/400[A]
Demand response capacity	case 1	1[MVA]
	case 2	2[MVA]
	case 3	3[MVA]

4.2 시험 장치에 의한 운용특성

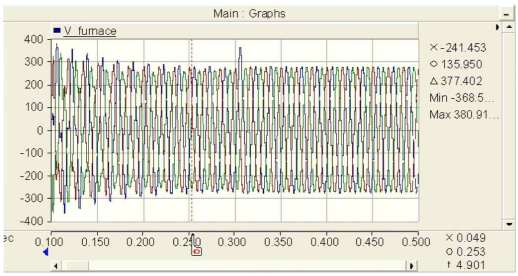
상기에서 제시한 구성 및 시험 조건을 바탕으로, DR 참여 용량에 따른 민감부하설비의 공급전압 특성을 분석하면 그림 8과

같이 나타낼 수 있다. 여기서, 일반적인 상황에서의 소결로 공급 전압은 260V로 유지되지만, DR 지령에 따라 일반부하설비의 용량을 약 1[MVA] 정도 감소시키면 공급전압이 268V로 상승함을 알 수 있다. 또한, 전압상승률은 약 3% 정도 발생하며, 현장에서 요구되는 전압 안정도인 5% 미만임을 알 수 있다. 하지만, DR에 참여하는 용량에 따라 민감부하설비의 공급전압에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

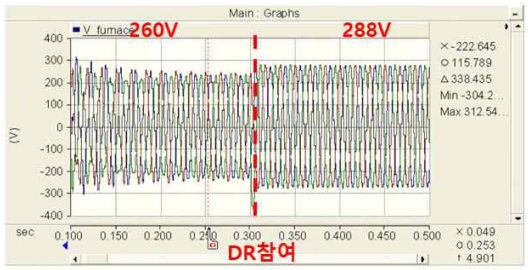
[그림 8] 시험장치에 의한 민감부하설비 공급전압 특성

4.3 시뮬레이션에 의한 운용특성

상기에서 제시한 모델링 및 시뮬레이션 조건을 바탕으로, DR 참여 용량에 따른 민감 부하설비의 전력품질 특성을 분석하면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 9의 (a)와 (b)는 각각 case 1, case 3의 민감 부하설비의 공급전압 곡선을 나타낸다. 이 그림에서와 같이, case 1의 경우, 공급전압이 각각 268[V]로 상승하지만, case 3의 경우, DR 참여에 따라 공급전압이 260[V]에서 288[V]까지 상승하는 것을 알 수 있다. 특히, case 3의 경우, 공급 전압의 상승율이 10[%] 이상 발생하여 민감 부하설비인 소결로 및 정형프레스 설비의 허용전압 이상으로 상승함을 알 수 있다. 따라서, DR에 참여하는 용량에 따라 민감부하설비의 전원 공급에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.



(a) case 1



(b) case 3

[그림 9] 시뮬레이션에 의한 민감부하설비 공급전압 특성

5. 결 론

본 논문에서는 DR제도에 실제 참여하고 있는 제조산업체 수용가의 구성을 제시하고, 이를 바탕으로 구내 배전계통부, 일반 부하설비부, 민감 부하설비부로 구성된 모델링을 수행한다. 여기서, 구내 배전계통부는 수전용 변압기, 구내 배전선로, 분기용 변압기 등으로 구성되고, 일반 부하설비부는 DR 제도에 참여하여 소모 전력을 감소시키는 공조 시스템, 조명설비 등으로 이루어진다. 또한, 민감 부하설비부는 소결로, 정형 프레스 등과 같이 높은 전력품질을 요구하는 제조설비로 상정한다. 상기에서 제시한 구성 및 모델링을 바탕으로 민감 부하설비의 전력품질 특성을 분석한 결과, DR 참여 지령에 따라 일반 부하설비의 소모 전력이 일시적으로 제한되는 경우, 동일한 구내 배전선로에 연계된 민감 부하설비에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

감사의글

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (02318111)

[1] 유영곤, 송병건, 강승진. (2007). 수요반응자원의 전력시장 도입효과 분석. 자원·환경경제연구 , 16(1), 99-127.