

국내외 저주파수 부하차단 시스템 운영 기준



안선주 | 전남대학교 전기공학과

1. 서론

전력

계통에서는 발전기의 탈락, 송전선로의 상정사고, 대규모 부하의 탈락 등 큰 외란이 발생할 수 있으며, 계통의 높은 신뢰도 유지를 위하여 이러한 외란에 대한 적절한 비상대책을 수립하여야 한다. 전력회사는 어떠한 상정사고에 대해서

도 높은 수준의 신뢰도를 제공할 수 있도록 충분한 발전력과 송전망의 용량을 유지하고 있지만, 예측할 수 없는 운전 조건의 변화, 사고, 유지보수를 위한 정전, 계통 분리 등에 의한 발전력 부족에 의한 수급 불안정은 피할 수 없다. 전력계통에서 전력 수급 불안정이 발생하면 계통 주파수의 저하 또는 상승을 초래하게 되며, 특히 대단위 발전기의 탈락에 의한 과도한 주파수 저하는 전력계통 안정운전을 저해할 뿐만 아니라, 주

표 1. 북미 지역신뢰도 기구별 저주파수 부하차단 시행 기록 (차단 부하량, MW)

연도	FRCC	MRO	NPCC	RFC	SPP	SERC	TRE	WECC
2003			17644	6,105			1549	
2004			24					
2005								
2006								
2007		486						
2008	2273		48		673(2회)			
2009								
2010								
2011				176				
2012			115					
2013			2000.5					

파수에 민감한 전동기 부하의 회전속도를 감소시켜 불량제품이 발생하는 등 산업 전반에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점에 대한 대책으로 주파수가 일정 이하로 저하되면 저주파수계전기(Under Frequency Relay : UFR)에 의해 일정량의 부하를 차단하여 계통주파수를 조속히 회복시키도록 하고 있다[1].

저주파수 부하차단(Under Frequency Load Shedding : UFLS)은 실시간 계통운영에서 수급 불안정에 대한 비상 긴급제어 수단들 중 가장 효과적인 수단 중 하나로 북미 지역에서는 표 1과 같이 2003년에서 2013년 사이에 12회에 걸쳐 최소 24MW에서 최대 17,644MW까지 저주파수에 의한 자동 부하차단이

이루어진 것으로 보고되었다[2]. 그림 1은 2008년 2월 26일 미국 Florida에서 발생한 사고로 인한 주파수를 나타내고 있다[3]. Miami 지역의 138kV 변전소에서 발생한 최초 사고가 즉시 제거되지 못하고 1.7초간 지속된 후 후비 보호 계전기에 의해 차단됨으로써 사고 주변 지역 약 1350MW 부하가 정전되고 17기 약 2500MW의 발전기가 탈락되었다. 이에 따라 주파수가 UFLS 동작 기준 이하로 저하되어 Florida 남부 및 중부 지역의 2273MW의 부하가 차단되고 주파수가 다시 정상상태로 회복되었다. 사고 발생 후 FRCC(Florida Reliability Coordinating Council)는 사고의 원인 및 영향을 분석하기 위하여 전문가들로 구성된 위원회를 구성하였고, 2008년 10월 제출된 보고서에서는 UFLS에 의한 부하차단이 계통의 과도 특성 향상에 도움을 주어 광역 정전으로 이어지는 것을 예방할 수 있었다고 분석하고 있다[3].

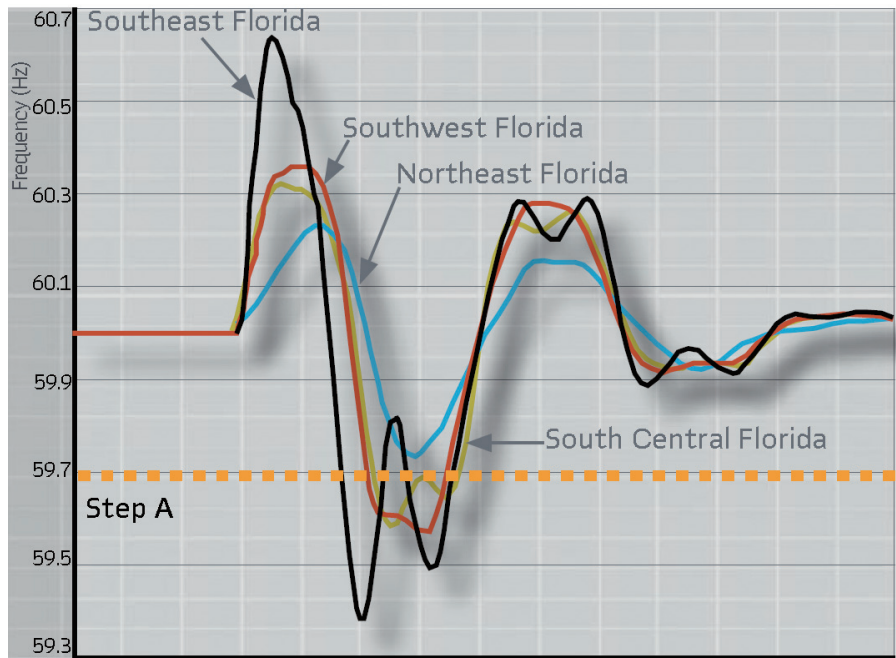


그림 1. 2008년 미국 Florida 지역 사고에 의한 주파수

저주파수 부하차단(Under Frequency Load Shedding : UFLS)은 실시간 계통운영에서 수급 불안정에 대한 비상 긴급제어 수단들 중 가장 효과적인 수단

본고에서는 북미, 유럽, 국내의 저주파수 부하차단 관련 규정의 비교분석을 통해 국내 규정의 개정을 위한 시사점을 도출하고자 한다.

2. 북미 저주파수 부하차단 관련 규정

북미 전력계통 신뢰도 관리기구 (North America Electricity Reliability Corporation : NERC)의 신뢰도 기준 문서[4] 중 UFLS의 설치 및 운영과 관련된 규정은 PRC-006-1 “Automatic Underfrequency Load Shedding”에 정의되어 있으며, UFLS 장치의 유지보수와 관련된 규정은 PRC-008-0 “Implementation and Documentation of Underfrequency Load Shedding Equipment Maintenance Program”이다.

PRC-006-1의 적용대상은 Planning Coordinator와 UFLS entity로, Planning Coordinator는 UFLS 계획의 수립 및 성능에 대한 평가 등을 담당하며, UFLS entity는 UFLS 설비를 소유, 운영 또는 제어하는 송전사업자나 배전사업자를 의미한다. PRC-006-1은 14개의 준수요건(Requirement)을 제시하

고 있으며, 주요 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

각 Planning Coordinator는 각각 정의한 독립계통(island) 내에서 전력수급 불균형 시나리오에 따른 계통 모의를 통해 다음과 같은 성능 특성을 만족하는 UFLS 계획을 수립해야 한다. 이 때, 수급불균형(imbalance)은 다음과 같이 정의하며

에 따라 필요시 부하가 차단될 수 있도록 해야 한다. 북미 계통은 다수의 전력회사와 계통운영자, 지역 신뢰도 기구가 서로 연계된 계통을 운영하고 있으므로, UFLS 계획 수립 시 인접한 Planning Coordinator와의 협조 사항에 대해서도 의무화하고 있는 것이 특징이다.

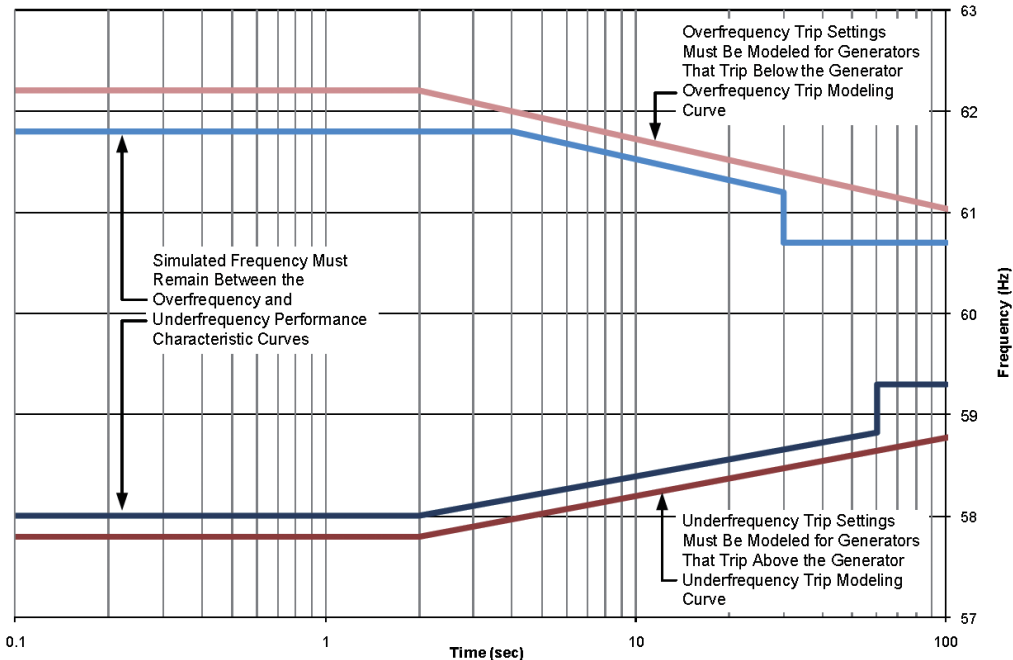


그림 2. NERC의 UFLS 계획 수립 및 성능 평가를 위한 주파수 특성 곡선

최대 25% 불균형 시나리오까지 모의하도록 규정하고 있다.

모든 수급불균형 시나리오 모의에서 주파수는 항상 그림 2에 정의된 과주파수 및 저주파수 성능 특성 곡선 이내에 유지되어야 하며, 60초 이내에 또는 정상상태에 도달했을 시 59.3 ~ 60.7 Hz 이내로 유지될 수 있도록 UFLS 계획이 수립되어야 한다. 또한, 20MVA 이상 단일 발전기 또는 75MVA 이상의 발전소 모선과 발전기의 승압변압기 고압측 모선에서 과여자 기준은 2초 이상 1.18V/Hz를 초과하지 않고 45초 이상 1.10V/Hz를 초과하지 않아야 한다. 각 Planning Coordinator는 UFLS 계획이 위에서 언급한 성능 특성을 만족하는지에 대하여 최소 5년에 한번 이상 동적 모의를 통해 평가하여야 한다.

UFLS entity는 Planning Coordinator가 수립한 UFLS 계획

계통에서 UFLS 계획의 최초 차단주파수 이하로 주파수가 저하되는 사고가 발생하면 각 Planning Coordinator는 사고 발생 1년 이내에 이에 대한 분석을 시행하여 UFLS 장치(UFR)의 동작 성능 및 UFLS 계획의 유효성을 평가하도록 하고 있다. 만약 위의 평가에서 UFLS 계획에 문제가 있으면 2년

이내에 UFLS 계획을 수정 보완하도록 규정하고 있다.

$$\text{수급불균형} = \frac{(\text{부하} - \text{실제 발전량})}{(\text{부하})} \times 100$$

3. 유럽의 저주파수 부하차단 관련 규정

유럽 계통운영자 협의회(European Network of Transmission System Operations for Electricity : ENTSO-E)에서는 저주파수 부하차단을 LFDD(Low Frequency Demand Disconnection)라는 용어로 정의하고 있다. LFDD 관련 규정은 송전사업자(TSO) 입장에서의 규정과 LFDD를 직접 시행하는 배전사업자 및 대규모 부하 소유자의 입장에서의 규정

표 2. ENTSO-E 동기영역별 LFDD 계획 수립 기준

Parameter	Continental Europe	Nordic	Great Britain	Ireland	Measuring Unit
Demand disconnection starting mandatory level: Frequency	49	48.7-48.8	48.8	58.85	Hz
Demand disconnection starting mandatory level: Demand to be disconnected	5	5	5	6	% of the Total Load
Demand disconnection final mandatory level: Frequency	48	48	48	48.5	Hz
Demand disconnection final mandatory level: Cumulative Demand to be disconnected	45	30	50	60	% of the Total Load
Implementation range	±7	±10	±10	±7	% of the Total Load, for a given frequency
Minimum number of steps to reach the final mandatory level	6	2	4	6	Number of steps
Maximum Demand disconnection for each step	10	15	10	12	% of the Total Load, for a given step

으로 구분되어 있다.

Network Code on Demand Connection의 Article 20 “Demand Disconnection for System Defence and Demand Reconnection”에서는 배전사업자 및 송전망연계 부하소유자 입장에서 준수해야 할 규정이 정의되어 있다[5]. 주파수 저하시 차단 주파수 기준 및 주파수 단계별 차단 부하의 비율은 TSO가 정의하며 배전계통운영자 및 송전망연계 부하소유자는 TSO의 계획에 따라 저주파수 시 해당 부하의 일정 비율을 자동 차단할 수 있어야 한다. 이를 위해 배전계통운영자와 송전망연계 부하소유자는 해당계통에서 차단할 부하의 지역적 배분에 관한 사항을 결정하고 TSO의 승인을 받아야 하며, 해당계통의 LFDD와 관련한 상세사항을 TSO에게 매년 보고하도록 규정하고 있다.

ENTSO-E는 계통의 비상, 광역정전 및 복구 상황(Emergency, Blackout, and Restoration State)에서의 운영 절차 및 준수요건에 관한 규정인 “Network Code on Emergency and Restoration”을 제정 중에 있으며, 이 중 Article 14 “Automatic under-Frequency control scheme”에서 TSO 입장에서의 LFDD에 관한 상세 사항을 정의하고 있다[6]. 계통의 저주파수에 대한 다양한 대책들 중 저주파수 부하차단은 발전기의 제한적 운영모드(Limited Frequency Sensitive Mode-Underfrequency)에 의한 출력 증가, 부하로

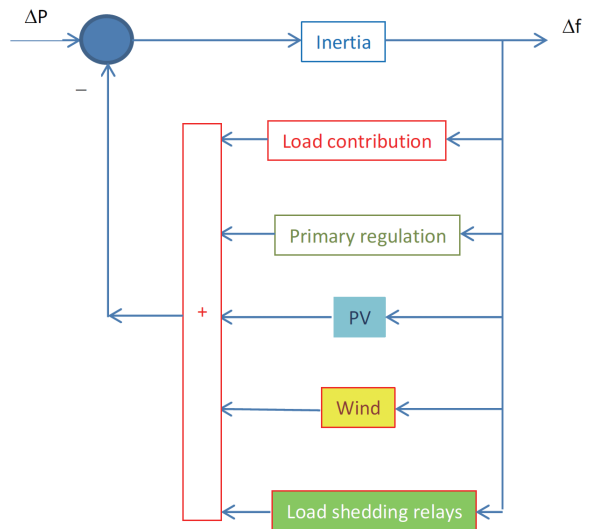


그림 3. LFDD 계획의 성능 평가를 위한 계통 모델의 구조

동작 중인(충전중인) 에너지저장시스템의 차단 이후에 시행하는 조치로 정의하고 있다.

각 TSO는 속해 있는 동기영역(Synchronous Area : SA) 별로 표 2에 정의된 기준에 따라 LFDD 계획을 수립해야 한다. 예를 들어 유럽 대륙 동기영역(SA Continental Europe)에 속한 TSO는 49Hz에서 최초 부하차단을 시행하며 이때 차단부하량은 전체 부하의 5%이다. 부하차단을 시행하는 최저 주파수는 48Hz이며, 누적 차단부하량은 전체 부하의 45%이다. 최초 차

단주파수와 최저 주파수 사이는 6단계 이상으로 구분해야 하며 각 단계별 차단부하량은 전체 부하의 10% 이내로 정해야 한다. Nordic, Great Britain, Ireland 동기영역의 TSO들도 위와 유사한 방식으로 표2의 기준에 따라 LFDD 계획을 수립한다. LFDD 계획의 성능은 부하수준, 신재생발전 비율, 탈락 발전량의 비율 등에 따른 다양한 시나리오를 고려한 계통 모의를 통해 평가하며, 계통 모의를 위한 모델링 요소는 그림 3과 같다[7].

저주파수계전기 부하차단 방식 결정, 저주파수계전기의 구비조건 등 상세 사항은 전력거래소의 “보호방식 적용방안” 중 “저주파수계전기 부하차단방식”에서 정의

저주파수계전기 부하차단 방식 결정, 저주파수계전기의 구비조건 등 상세 사항은 전력거래소의 “보호방식 적용방안” 중 “저주파수계전기 부하차단방식”에서 정의하고 있다[9]. 저주

파수계전기 부하차단 방식은 『전력계통에서 발생 가능한 최대 발전력 탈락조건을 상정하고 계통의 각종 정수(주파수 특성정수, 조속기 시정수, 관성정수, 순동예비율 등)를 고려하여 계통검토를 시

행하고 주파수가 신속히 회복되도록 결정』 하도록 정의하고 있다. 그러나 ‘발생 가능한 최대 발전력 탈락조건’, ‘신속히 회복되도록’ 등 일부 해석이 모호한 부분이 있어 계통 검토자의 주관적 판단이 개입될 여지가 있다. 따라서 향후 저주파수 계전기에 의한 부하차단 계획과 관련한 규정을 재개정할 시 이와 관련한 주요 파라미터 및 성능 평가 기준을 구체적이고 명확하게 정의할 필요가 있다고 판단된다. 예를 들어 저주파수 계전기에 의한 최초 차단주파수, 부하차단 계획 수립을 위한 최대 상정 고장 비율, 허용 가능한 주파수의 과도 특성 등에 관한 기준 등을 국내 계통의 상황에 맞게 정의하고 이에 따라 저주파수계전기에 의한 부하차단 계획이 수립되도록 해야 한다.

전력거래소에서 수립한 부하차단계획에 따른 차단부하 확보량의 배분, 저주파수 계전기의 설치검토, 저주파수계전기 운영, 시험 및 점검 등 구체적인 시행방안에 관해서는 한국전력의 “계통보호업무처리지침” 및 “계통보호업무편람”의 “저주

4. 국내 저주파수 부하차단 관련 규정

국내 저주파수 부하차단 관련 기본 사항은 전력시장운영규칙 “별표16 계통보호 절차”의 “10.0 부하차단용 저주파수계전기 적용 및 운영절차”에 정의되어 있다[8]. 전력거래소는 발전력 탈락, 계통분리 등으로 인한 계통주파수 저하시 주파수 회복을 위하여 저주파수계전기에 의한 부하차단계획을 수립하고 각전기사업자에 통보하며, 계통 수요의 급격한 증가, 신규 저주파수계전기 도입, 345kV 이상 기간 계통망 변경 등 필요시 부하차단계획을 재검토하도록 규정하고 있다. 각 전기사업자는 매 분기마다(3, 6, 9, 12월 3번째 수요일 기준) 주파수 단계별 차단부하 확보량 및 운영관련 사항을 조사하여 전력거래소에 통보하여야 한다.


표 3. 국내 주파수 단계별 차단부하 확보량 기준

차단단계	육지계통			제주계통		
	주파수 [Hz]	동작시간	차단부하	주파수 [Hz]	동작시간	차단부하
1단계	59.0	6cycle	6%	59.2	10cycle	10%
2단계	58.8	6cycle	6%	59.0	10cycle	10%
3단계	58.6	6cycle	6%	58.6	10cycle	10%
4단계	58.4	6cycle	6%	58.4	6cycle	10%
5단계	58.2	6cycle	6%	58.0	6cycle	7%
6단계	58.0	6cycle	5%	57.6	6cycle	5%
후비	59.0	12초	4%	-	-	-
계	-	-	39%	-	-	52%

파수계전기 관리업무”에서 정의하고 있다[10, 11]. 현행 저주파수계전기에 의한 차단부하 확보량은 표 3과 같이 육지계통 6단계(후비 포함 7단계) 39%, 제주계통 6단계 52%이다.

부하차단용 저주파수계전기가 동작되면 전기사업자는 동작된 저주파수계전기와 해당 차단 Feeder 및 부하량 등 관련 사항을 전력거래소에 통보하며, 전력거래소는 계통주파수 저하특성을 검토하고 필요시 대책을 수립하여 각 전기사업자에게 통보하도록 규정하고 있다.

5. 결 론

저주파수계전기에 의한 부하차단은 발전력 부족에 의한 수급 불균형시 계통붕괴 방지 및 신뢰도 유지를 위한 중요한 제어 수단이다. 본고에서는 북미 NERC, 유럽의 ENTSO-E 및 국내의 저주파수 부하차단 관련 규정을 검토하였다. NERC 규정은 UFLS 계획 수립을 위한 수급불균형 검토 기준 및 주파수 응답 특성 기준을 제시하고 있으며 ENTSO-E에서는 각 동기영역별 최초, 최저 차단주파수 및 주파수단계 설정 등에 관한 기준을 제시하고 있다. 국내 규정에서도 북미 및 유럽과 유사한 수준의 저주파수 부하차단 기준을 제시하고 있으나 일부 규정은 주관적 해석이 개입될 여지가 있는 것으로 분석되었다. 현재 국내 전력계통의 신뢰성을 관리·감독할 신뢰도관리기구의 설립을 추진중이며 이에 따라 신뢰도기준의 보완 및 개정을 준비중에 있다. 따라서 본고에서 분석한 해외기준의 시사점을 고려하여 각 기관간의 명확한 역할 분담 및 국내계통의 특성을 반영한 구체적인 저주파수 부하차단 기준이 마련될 수 있을 것으로 기대된다. 

참 고 문 헌

- [1] 김규호, 송경빈, 김일동, 양정재, 조범섭, “전력계통 신뢰도 강화를 위한 저주파수계전기의 적정 부하차단 방안,” 전기학회논문지, Vol. 59, No. 7, pp. 1214-1220, 2010.
- [2] <http://www.nerc.com/pa/RAPA/ri/Pages/UnderFrequencyLoadShedding.aspx>
- [3] Clare Duffy, “Florida Disturbance 2008 Blackout Watch,” pacworld, Winter 2009 issue, Mar. 2009.
- [4] NERC, “Reliability Standards for the Bulk Electric Systems of North America,” Nov. 5, 2014.
- [5] ENTSO-E, “ENTSO-E Network Code on Demand Connection,” Dec. 21, 2012.
- [6] ENTSO-E, “ENTSO-E Network Code on Emergency and Restoration,” Mar. 25, 2015.
- [7] ENTSO-E, “Technical background for the Low Frequency Demand Disconnection requirements,” Nov. 2014.
- [8] 전력거래소, “전력시장운영규칙,” Oct. 2013.
- [9] 전력거래소, “보호방식 적용방안,” May 2003.
- [10] 한국전력공사, “계통보호업무편람,” Mar. 2012.
- [11] 한국전력공사, “계통보호업무처리지침,” Mar. 2012.