

제주도 풍력발전기 출력변동성을 고려한 적정 UFR 차단방식 연구

On UFR Settings Considering Wind Power Fluctuation In Jeju Island

박민수* · 전영환† · 변성현** · 양정재***

(Min-Su Park · Yeong-Han Chun · Sung-Hyun Byun · Jeong-Jae Yang)

Abstract - Jeju power system is connected to the mainland power system through HVDC, and receives about half of required electricity through the HVDC lines. Jeju power system already experienced black out when a generator tripped at the moment of the HVDC line faults. But, UFR operated as was expected when HVDC line fault occurred at that time. As the penetration level of wind turbines increases, it is required to set UFR again considering intermittent wind turbin outputs. In this paper, we address a new way of UFR setting through computer simulation.

Key Words : Wind power, HVDC, UFR, Load shedding, Jeju

1. 서 론

전력 계통에서 부하에 알맞게 전력을 공급하고 신뢰도를 유지하는 것은 계통운영자의 기본업무이자 주된 관심사이다. 전력수급 불안정으로 계통주파수가 하락하거나 상승하는 사고의 경우 특히 대단위 발전기의 탈락에 의한 과도한 주파수 저하는 전력계통의 안정적인 운전을 저해할 뿐만 아니라, 주파수에 민감한 전동기 부하의 회전속도를 느리게 하여 불량제품이 발생하는 등 산업전반에 걸쳐서 악영향을 미치게 된다. 이러한 문제점으로 주파수가 일정수준 이하로 하락하면 저주파수 계통기에 의해 일정량의 부하를 차단하여 계통주파수를 조속히 회복시키도록 하고 있다.

저주파수 부하차단 방식은 계통에 사고가 발생하여 발전력이 부족한 경우 전력계통을 안정화하는 최후의 방어수단으로 제주계통은 2006년 4월 전계통 정전 이후 HVDC 2회선 및 발전기 1기 정지에 대비하여 운영되고 있다. 2013년 제2의 HVDC 2회선이 완공되었으며 차후 해상풍력을 포함한 대용량의 풍력설비가 계통에 병입될 예정으로 제주지역 전력계통이 크게 변화할 전망이다. 이에 따라 새롭게 변화하는 제주 전력계통에 알맞은 UFR 세팅이 요구된다. 본 논문에서는 풍력과 같은 신재생 에너지원의 계통투입이 주파수와 UFR 동작에 미치는 영향들에 대한 연구를 진행하고 제주지역에 적절한 UFR 방식을 제안하였다.

2. 본 론

제주지역의 UFR 차단방식의 적절성을 검토하기 위해서 제주계통의 특성을 분석하였다. 풍력 발전기의 실제 출력 데이터를 이용하여 풍력발전기의 출력변동성을 산정하였고

제주계통의 발전기 탈락 사례를 바탕으로 발전기정수 및 부하정수 등의 계통정수를 산정하였다. 그리고 새롭게 변화하는 제주계통 상황에 알맞은 상정사고를 산정하고 사고발생에 따른 주파수 시뮬레이션 진행하였다. 발전기의 동요 방정식을 이용하였고 제주 발전기의 4가지 조속기 종류를 고려하여 제주계통을 4기 발전기 시스템으로 등가화 하였다.

2.1 제주 계통의 특성분석

2.1.1 제주 계통의 UFR 차단기준

현재 제주계통의 UFR 차단방식은 2006년도에 개정되었으며 총 5단계로 최대 52%의 부하차단이 이루어진다. 단계별 주파수 범위는 0.4 Hz와 0.2 Hz로 일정하지 않으며 단계별 차단부하량도 10%, 7%, 5%로 각기 다르게 이루어진다.

표 1 2006년 개정된 제주 계통 UFR 차단방식

Table 1 The revised UFR settings of Jeju in 2006

단 계	이 전			변 경		
	Tap (Hz)	차단부하 (%)	지연시간 (cycle)	Tap (Hz)	차단부하 (%)	지연시간 (cycle)
제1단계	59.0	10	10	59.2	10	10
제2단계	58.8	10	10	59.0	10	10
제3단계	58.4	10	10	58.6	10	10
제4단계	58.0	10	6	58.4	10	6
제5단계	57.6	6	6	58.0	7	6
제6단계				57.6	5	6
계		46%			52%	

제주의 UFR 차단방식은 제2 HVDC 2회선의 계통연계와 높은 점유율을 갖게 될 풍력 발전기의 계통 투입 등 새롭게 변화하는 제주계통 환경을 고려해야 하며, 사고발생 시 제주계통을 안정적으로 유지해야 한다. 이를 위해 기존의 UFR 차단방식의 적절성을 검토해야 하며 미래 제주계통에 알맞은 UFR 차단방식을 선정해야 한다.

2.1.2 발전 구성 및 발전 우선순위

발전기 급전은 일반적으로 발전기의 경제성을 고려한

* Department of Electrical and Electronic Engineering, Hongik University, Korea

† Corresponding Author : Department of Electrical and Electronic Engineering, Hongik University, Korea

E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

** Power Grid Protection Team, Korea Power Exchange

*** Power Grid Protection Team, Korea Power Exchange

Received : November 16, 2013; Accepted : January 23, 2014

merit order에 의해서 이뤄진다. 제주계통의 발전기 merit order가 존재하지만, 실제적으로는 안정적인 제주계통의 전력공급을 위해 발전기의 급전 발전기의 정지시간과 기동시간도 함께 고려하여 이루어진다.

제주TP(기력)발전기의 정지시간은 12시간이며 기동시간은 47분이며 남제주TP(기력) 발전기의 정지시간과 기동시간은 각각 6시간이다. 이 발전기들은 기동정지가 결정된 이후 다시 재가동하기까지 최소 12시간이 소요되기 때문에 must-run 발전기로 HVDC 다음의 우선순위를 가지며, 기동정비나 사고 등의 이유를 제외하고 항상 계통에 연계되어 운전된다. 계통의 수요가 낮은 경우, 이들 발전기는 최소 발전량으로 운전되고 나머지 수요는 HVDC의 출력을 조절하여 급전이 이루어진다. HVDC와 남제주, 제주TP 발전기가 담당하고 남은 양은 기존의 merit order에 따라 이뤄진다.

표 2 제주계통의 발전 급전순위

Table 2 Merit order of Generator in Jeju

구분	공급 능력	누계	우선 순위	최대 배분량	누계	최소 발전량
연계선#1	150	150	1	150	150	40
연계선#2	250	400	1	250	400	40
남제주기력#3	100	500	2	95	495	50
남제주기력#4	100	600	2	95	590	50
제주기력#2	79	679	2	75	665	42
제주기력#3	79	758	2	75	740	42
제주내연#1	40	798	3	38	778	26
제주내연#2	40	838	4	38	816	26
한림복합	105	943	5	90	906	41
발전합계	943			906		357

2.1.3 제주계통의 풍력 변동성

풍력은 기후나 날씨의 영향을 많이 받는 출력을 제어할 수 없는 신재생 자원으로, 빠르게 변화하는 풍력의 출력변동성은 계통의 전력수급 불균형을 초래할 수 있다. 따라서 계통 규모에 비해 많은 양의 풍력설비가 계통에 연계되면 주파수 변동에 큰 영향을 줄 수 있다. 풍력발전기가 계통에 미치는 영향을 분석하기 위하여 제주계통에 발생할 수 있는 풍력변동성을 실측 데이터를 기반으로 산정하였다.

풍력변동성 분석에 사용된 데이터는 2011년 11월 18일과 12월 22일 하루 동안의 제주 풍력단지들의 출력 데이터이다. 2초 간격으로 풍력단지의 출력이 측정되어 있으며 행원, 한경, 삼달, 성산 풍력단지가 분석에 사용되었다. 10초 동안의 출력변동성을 분석하였으며 개개의 풍력단지와 풍력단지 전체의 출력을 분석하여 제주계통 풍력발전의 출력 변동성을 산정하였다. 가장 큰 변동을 보인 발전단지는 삼달 풍력단지로 시설용량 기준 36.12%의 변동성을 보였으며 풍력단지 전체출력의 변화비율은 시설용량 기준 16.15%의 변동성을 보였다. 이를 기준으로 변동성의 마진을 두어 10초 동안 시설용량 대비 20% 변화를 제주계통의 출력변동성으로 산정하였다.

표 3 제주 계통 풍력발전기의 변동성

Table 3 Fluctuation of Wind Power in Jeju

풍력단지	행원	한경	삼달	성산	전체출력
시설용량	9.8	21	33	22	85.8
출력변화(MW)	0.82	2.18	12.91	3.08	13.96
변화비율(%)	8.4	10.36	36.12	14.02	16.15

2.1.4 제주 계통수요 및 풍력용량 산정

계통수요는 '제 5차 전력수급 기본계획'을 기준으로 산정하였다. 2010년에 발표된 '제 5차 전력 수급 기본계획'의 2010년부터 2024년까지 최대 전력 수요량에 대한 예측을 활용하였고 '제5차 전력수급 기본계획'을 기반으로 제주지역의 연도별 전력수급 전망을 작성하였다. Off-peak시 계통 수요는 연도별 최대 전력수요 증가율을 2012년부터 2015년 off-peak시 부하량에 적용하여 사용하였다. 표 4는 2012년부터 2025년까지 예상되는 전력 수요량을 나타낸 것이다. [2]

표 4 제주지역의 연도별 예상 전력수요량

Table 4 Estimated annual Power demand in Jeju

연도	전력수요량(MW)		발전설비용량(MW)	
	Off-Peak	Peak	하계	연말
2012	433	687	692	699
2013	446	708	644	649
2014	473	750	672	696
2015	499	791	696	719

풍력발전은 바람의 세기에 따라 초, 분 시간 단위별 변동성이 큰 에너지원으로 풍력발전의 출력변동성으로 수급 불균형이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 풍력용량과 제주계통에 현재 건설 중이거나 앞으로 건설될 예정인 풍력용량을 고려하여 풍력용량을 산정하였다. 현재 제주지역의 풍력발전 설비량은 106.91MW (62대)이며 2013년 3월까지 30MW, 2014.2월까지 150MW 추가로 건설될 예정이다. 표 5에 제주지역에 설치 예정된 풍력설비가 건설되었을 경우 2012년부터 2015년까지 제주지역의 풍력설비량을 산정하였다. 풍력 발전기들이 이용률 80%의 출력을 낸다고 가정하였을 때 2015년까지 계통에 투입되는 풍력발전기의 출력을 산정하였다.

표 5 제주지역의 풍력설비량

Table 5 Estimated Wind Power Capacity in Jeju

연도	총 풍력발전 설비용량(A)	총 풍력발전 설비용량(A)×0.8
2012	106.91	86
2013	136.91	109.6
2014	136.91	109.6
2015	286.91	230

2.1.5 제주계통의 계통정수 산정

전력계통의 관성정수와 발전기정수는 계통에 투입된 발전기 구성에 의해 결정이 되며, 계통의 주파수 변화는 관성정수와 발전기정수에 의해서 큰 영향을 받는다. 제주지역이 산업용부하가 적은 관광단지임을 고려하여 부하정수(KL)를 1로 가정하였고, 제주계통의 사고 실측데이터를 이용하여 제주 계통의 발전기정수를 산정하였다. 정확한 계통정수를 산정하기 위해서는 사고발생 이후 정상상태의 최종주파수를 이용하여 계통정수를 역산하여야 하지만, 최종주파수 데이터 값이 존재하지 않기 때문에 최저주파수를 이용하여 계통정수를 산정하였다. 부하차단이 일어나는 경우 정확한 계통정수의 산정이 어렵기 때문에 부하차단이 발생한 실측데이터를 제외한 나머지 사례를 활용하여 계통정수를 산정하였다. 발전기 탈락 시뮬레이션을 진행하였으며 발전기의 출력은 탈락량과 같다. 임의의 계통정수를 대입, 반복하여 최저

주파수에 알맞은 값을 찾아가는 방식을 취하였다. 주파수 시뮬레이션을 위해서 계통을 1기 발전기 모선으로 등가화 하였고 동요방정식(swing equation)을 이용하여 계통의 주파수변화 시뮬레이션 진행하였다.

표 6은 부하정수 KL을 1로 가정하고 최저주파수가 실측치와 같아지도록 계통정수를 대입, 반복하는 과정을 통해 얻은 값들이다. 큰 편차를 보이는 2001년(KG=19.8)의 경우를 제외하면 대략 평균적으로 10.5 내외의 값을 갖는다. 부하정수 KL을 1로 그리고 발전기정수를 10.5 내외로 가정하여 시뮬레이션을 진행하였으며 계통의 수요와 발전기 구성에 따른 발전기정수의 차이는 상대적으로 작으므로 무시하였다.

표 6 제주계통 발전기 정수
Table 6 Estimated Generators Constant in Jeju

년도	일시	계통수요	탈락량	최저 주파수	발전기 정수
		(MW)	(MW)	(Hz)	KG
2001	01.0403:14	218	31	59.08	10.93
2001	03.2712:38	231.5	22	59.58	19.8
2004	04.2611:25	289	10	59.76	9.3
2006	04.3016:49	320	38	59.21	10.8

2.2 주파수 시뮬레이션

2.2.1 상정사고 시나리오 설정

제주계통에 알맞은 UFR 차단방식을 수립하기 위해서 제주계통에 발생 가능한 상정사고를 설정하고 현재의 UFR 차단 방식의 적절성을 분석하는 시뮬레이션을 진행하였다. UFR 차단 방식의 적절성을 판단하기 위해서는 제주계통 환경에 알맞은 상정사고의 수립이 매우 중요하다. 제주지역 전력계통의 변화를 고려하여 제주계통에서 가장 큰 규모의 발전기인 남제주TP 발전기의 탈락과 HVDC 탈락 그리고 풍력발전기 출력변동성의 발생을 상정사고로 선정하였다. 이를 활용하여 다음과 같은 시나리오를 선정하였다.

- a. 모든 HVDC가 예방정비 중 남제주TP 발전기의 탈락
- b. 하나의 HVDC가 예방정비 중 나머지 하나의 HVDC가 운전 중 탈락
 - HVDC 출력은150MW, 200MW(용량 50%)
- c. 남제주TP or HVDC 탈락 + 풍력변동성 발생
- d. 하나의 HVDC가 예방정비 중 나머지 하나의 HVDC가 운전 중 탈락. + 남제주TP 발전기의 탈락
 - HVDC의 탈락 1.5초 후에 남제주TP 발전기의 탈락

제주계통의 HVDC 중 하나의 HVDC라도 운전 중인 상황이라면 사고발생으로 인해 부족한 발전량을 HVDC가 빠르게 take-over 할 것으로 예상된다. 따라서 사고발생 후 계통에 HVDC가 운전 중이지 않은 상황만을 고려하였다. HVDC의 출력은 용량의 50%로 산정하였다.

2.2.2 시뮬레이션 case 설정

상정사고들을 고려하여 시뮬레이션 case를 설정하고 연도별 peak 부하와 off-peak 부하에 따라 발전기와 풍력 발전량을 설정하였다. 풍력변동성의 발생은 남제주TP나 HVDC 탈락 사고에 함께 발생하는 case이기 때문에 편의성을 위해 발전기의 급전량을 함께 구성하였다. 다양한 case들이 존재하기 때문에 각각의 case를 쉽게 분류하기 위해 다음의 표기 방법을 적용하였다.

oph150w

- op: off-peak load (op) peak load(p)
- h150: HVDC 수전량을 의미. h가 없다면 HVDC 탈락 케이스가 아님
- w: 풍력 발전의 고려 여부를 나타냄

2.2.3 주파수 시뮬레이션 모델링

제주계통에서 운전되고 있는 발전기들의 조속기 타입은 IEEEG1, GAST2A, TGOV, DEGOV 4가지이다. 주파수 시뮬레이션을 위해서 각 발전기 조속기의 block diagram을 활용하여 발전기의 출력변동을 모델링하였다.[3] 발전기의 관성계수 H는 발전기가 동기속도로 회전할 때 발전기가 가지는 에너지를 정격용량으로 표준화한 값이다. 다음 식(1)은 발전기 관성계수를 나타낸 식이며 여기서 $J[kg \cdot m^2]$ 는 회전 모멘텀, ω_m^0 는 동기회전속도, S_{rate} 는 발전기의 정격용량이다. 국내의 동기회전속도는 60Hz이다.[4]

$$H[sec] = \frac{1}{2} J \omega_m^0{}^2 [MW \cdot sec] / S_{rate} [MVA] \quad (1)$$

동기기의 회전속도 (ω_s) 변화는 다음의 동요 방정식으로 통해 계산되며 여기서 $T_a [N \cdot m]$ 는 가속 토크, T_m 은 기계적 토크, T_e 는 전기적 토크이다.

$$J \frac{d\omega_s}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad P = \omega T \quad (2)$$

$$2H \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{1}{\omega_s} (\overline{P_m} - \overline{P_e}) \quad (3)$$

$$\overline{\omega_s} = \frac{\omega_s}{\omega_s^0}, \overline{P_m} = \frac{P_m}{S_{rate}}, \overline{P_e} = \frac{P_e}{S_{rate}}$$

기계적 에너지 Pm은 제주 발전기의 조속기 타입에 따라 변화한다. 계통주파수의 변화는 무계정수 H와 발전기 및 HVDC의 탈락과 풍력 변동성으로 발생하는 기계적 에너지와 전기적 에너지 차이에 의해 계산된다.

2.3 기존 UFR 차단방식을 적용한 주파수 시뮬레이션

2.3.1 남제주 TP발전기 탈락 & 풍력 변동성 - 풍력의 출력 감소

표 7 기존 UFR 차단방식을 적용한 남제주TP 탈락결과
Table 7 NamJejuTP Trip simulation Results of applying current UFR Settings

년도	Case	제주 부하량	최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	탈락량 (MW)	부하 차단량 (MW)	풍력 (MW)
2012년	op	433	58.938	60.149	95	87.54	-
	opw	433	58.884	-	95	87.54	86
2013년	op	446	58.931	60.105	98	89.54	-
	opw	446	58.919	60.066	85	89.54	109.6
2014년	op	473	58.957	60.21	99	95.96	-
	opw	473	58.936	60.209	90	96.04	109.6
2015년	op	499	59.009	-	96	50.060	-
	opw	499	58.977	60.468	70	100.94	230

표 7은 HVDC가 예방정비로 인해 운전되지 않는 제주계통에서 가장 큰 규모의 발전기인 남제주TP 발전기가 탈락하는 시뮬레이션 결과이다. 다수의 주파수 overshoot가 발생하였고 부하차단은 탈락한 발전량 대비 평균 95.7%가 이뤄졌으며 탈락한 발전량보다 높은 부하차단도 발생하였다. HVDC가 모두 예방정비중인 경우에는 peak 부하를 감당할 수 없기 때문에 off-peak 상황을 고려하였다. 전체적으로 2단계의 부하차단이 이루어졌고 2015년에 풍력변동성이 발생한 경우 60.486.Hz의 overshoot가 발생하였다. 전체적으로 주파수 변화가 크게 나타났으며 95.7%의 높은 부하차단이 이뤄졌다.

2.3.2 HVDC 탈락 & 풍력 변동성 - 풍력의 출력 감소

표 8 기존 UFR 차단방식을 적용한 HVDC 탈락 결과
Table 8 HVDC Trip simulation Results of applying current UFR Settings

년도	Case	제주 부하량	최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	탈락량 (MW)	부하 차단량 (MW)	풍력 (MW)
2012년	oph200	433	58.109	60.04	200	174.2	-
	oph168w	433	58.462	-	168	130.56	86
	ph200	687	58.727	-	200	138.1	-
	ph200w	687	58.585	60.34	200	207.6	86
	oph150	433	58.517	60.045	150	130.5	-
	oph150w	433	58.509	-	150	130.47	86
	ph150	684	58.923	-	150	136.86	-
	ph150w	687	58.892	-	150	137.48	86
2013년	oph200	446	58.285	60.076	200	179.52	-
	oph160w	446	58.482	-	160	134.6	109.6
	ph200	708	58.65	-	200	142.4	-
	ph200w	708	58.539	60.344	200	213.48	109.6
	oph150	446	58.529	60.104	150	134.52	-
	oph150w	446	58.519	-	150	134.5	109.6
	ph150w	708	58.871	60.033	150	142.24	109.6
2014년	oph200	473	58.321	60.262	200	192.36	-
	oph200w	473	58.311	60.046	200	192.24	109.6
	ph200w	750	58.905	60.14	200	150.7	109.6
	oph150	473	58.605	-	150	96.14	-
	oph150w	473	58.542	60.049	150	150.64	109.6
	ph150w	750	58.855	60.153	150	150.64	109.6
2015년	oph200	499	58.339	60.389	200	200.72	-
	ph200w	791	58.59	60.246	200	237.3	230
	oph150	499	58.648	-	150	100.34	-
	oph110w	499	58.904	-	110	93.06	230
	ph150w	791	58.736	60.103	150	158.2	230

표 8은 HVDC가 탈락하는 시뮬레이션의 결과이다. 전력 수요의 증가로 2014년 계통부터 HVDC의 예방정비가 진행되는 경우에 풍력발전기가 투입되지 않으면 계통의 peak 부하를 감당할 수 없다. 차단된 부하량은 탈락한 발전량 대비 89.9%로 나타났으며 최대 4단계의 부하차단이 이뤄졌다. Peak 부하의 경우 계통에 연계된 발전기들이 많고 부하량이 크기 때문에 상대적으로 단계별 부하차단량이 작은 off-peak의 경우보다 낮은 단계의 부하차단이 이루어졌다. 풍력 발전기는 기존의 발전기들을 대체하여 투입되기 때문에 무계정수와 발전기 정수가 0인 풍력발전기의 투입은 계통정수를 감소시킨다. 풍력발전기가 투입된 계통은 풍력 변

동성의 발생으로 주파수 하락의 폭이 증가하였으며 이로 인해 추가적인 부하차단이 이뤄지는 경우가 발생하였다.

2.3.3 HVDC와 남제주 TP의 순차적인 탈락

표 9 기존 UFR 차단방식을 적용한 HVDC 남제주 TP 탈락 결과

Table 9 HVDC & NamJeuTP Trip simulation Results of applying current UFR Settings

년도	Case	제주 부하량 (MW)	최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	탈락량 (MW)	부하 차단량 (MW)
2012년	oph200tp	433	57.56	-	215.46	226.2
	ph200tp	687	58.338	60.138	295.5	276
	oph150tp	433	57.973	-	235.07	204.45
	ph150tp	684	58.473	-	250	205.2
2013년	oph200tp	446	57.768	-	267.76	211.03
	ph200tp	708	58.398	60.122	296	282.8
	oph150tp	446	58.119	-	232.36	180
2014년	oph200tp	473	57.831	-	280.9	225.6
	oph150tp	473	58.254	-	235.74	192
2015년	oph200tp	499	57.871	-	288.75	235.94
	oph150tp	499	58.254	-	240.65	199.6

HVDC와 남제주 TP의 순차적인 탈락 시뮬레이션은 본 연구에서 가정된 가장 심각한 상정사고이다. 최대 6단계의 부하차단이 이뤄졌으며 주파수 하락이 가장 크게 일어났다. 특히 off-peak의 경우는 계통에 투입되는 발전기의 수가 상대적으로 적어서 주파수 변화가 크게 이뤄졌고, 높은 단계의 부하차단이 이뤄졌다. 2012년에는 57.56Hz를 기록하며 6단계의 부하차단이 이뤄졌으며, 현재 UFR 차단방식인 7단계의 52%의 부하차단은 연구에서 고려한 상정사고들에 대해서 주파수 회복이 가능하다.

2.4 새로운 UFR 차단 방식

기존의 방식이 단계별 차단범위와 차단량이 다른 점을 수정하여 단계별 주파수 범위와 차단량이 일정한 새로운 UFR 차단 방식을 제안하였다.

1단계 UFR 차단주파수는 59.2Hz로 기존의 방식과 같으며 단계별 주파수 범위는 0.2Hz로 동일하게 설정하였다. 1단계의 59.2Hz부터 7단계의 58Hz까지 총 7단계로 차단단계를 설정하였다. 기존의 10% 차단량을 수정하여 차단량을 7%로 좀 더 세밀하게 부하를 차단할 수 있도록 설정하였고, 이 때 UFR을 통해 이뤄지는 부하차단은 최대 49%이다. 수정된 새로운 UFR 차단방식으로 시뮬레이션을 진행하였다.

표 10 새로운 UFR 차단방식

Table 10 New UFR Setting

단계	이전			변경(안)		
	Tap (Hz)	차단부하 (%)	지연시간 (Hz)	Tap (Hz)	차단부하 (%)	지연시간 (Hz)
제1단계	59.2	10	10	59.2	7	10
제2단계	59	10	10	59	7	10
제3단계	58.6	10	10	58.8	7	10
제4단계	58.4	10	6	58.6	7	10
제5단계	58	7	6	58.4	7	10
제6단계	57.6	5	6	58.2	7	10
제7단계				58	7	10
계		52%			49%	

2.4.1 새로운 방식과 기존의 방식 비교

새롭게 제안한 UFR 방식의 적절성을 분석하기 위해서 앞서 진행하였던 HVDC 탈락 시뮬레이션과 HVDC와 남제주 TP의 순차적인 탈락 시뮬레이션을 진행하고, 기존의 UFR 방식을 적용한 방법과 비교 분석하였다.

표 11 기존의 방식과 새로운 방식을 적용한 HVDC 탈락 및 풍력 변동성 시뮬레이션 결과 비교

Table 11 HVDC Trip simulation Results of applying current & new UFR Settings

년도	Case	기존의 UFR			새로운 UFR		
		최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	부하 차단량 (MW)	최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	부하 차단량 (MW)
		2012년	oph200	58.109	60.04	174.2	58.162
2012년	ph200w	58.585	60.34	207.6	58.576	60.126	193.24
	oph150	58.517	60.045	130.5	58.359	-	91.35
	ph150w	58.892	-	137.48	58.831	-	96.24
2013년	oph200	58.285	60.076	179.52	58.345	-	157.1
	ph200w	58.539	60.344	213.48	58.559	60.073	199.24
	oph150	58.529	60.104	134.52	58.527	-	125.56
	ph150w	58.871	60.033	142.24	58.856	-	99.5
2014년	oph200	58.321	60.262	192.36	58.271	-	168.3
	oph150	58.605	-	96.14	58.579	60.132	134.6
	ph150w	58.855	60.153	150.64	58.907	-	105.46
2015년	oph200	58.339	60.389	200.72	58.300	60.012	175.6
	ph200w	58.59	60.246	237.3	58.614	-	166.1
	oph150	58.648	-	100.34	58.611	-	105.36
	ph150w	58.736	60.103	158.2	58.769	60.161	166.1

표 11은 새롭게 제안한 UFR 차단방식을 적용한 시뮬레이션의 결과이다. 새로운 차단방식 기준으로 2단계에서 6단계까지의 부하차단이 일어났다. 기존의 방식이 발전량 대비 89%의 차단이 이뤄진 반면, 새로운 UFR 방식의 경우 탈락량 대비 83%로 더 적은 부하차단으로 계통을 안정화시켰다. HVDC 200MW 탈락 시뮬레이션의 경우 기존의 방식은 4단계로 40%의 부하차단이 일어난 반면 새로운 방식은 35%와 42%의 부하차단이 일어나 기존의 방식보다 더 세밀한 부하차단이 이뤄졌다. 적정량의 부하차단을 통해 주파수 overshoot의 발생빈도와 크기도 또한 감소하였고 반면 최저 주파수의 크기는 대동소이한 결과를 보였다. 부하차단량과 주파수 overshoot를 기준으로 분석하였을 때 새로운 UFR 방식이 기존의 방식보다 더 적절한 부하차단이 이뤄졌다.

표 12는 새로운 UFR 차단 방식을 적용한 HVDC와 남제주TP 발전기의 순차적인 탈락 시뮬레이션 결과이다. 이 시뮬레이션이 본 연구에서 가장 심각한 상정사고이며 새로운 UFR 차단방식 적용 시에 주파수 안정화를 이루어야 한다. 기존의 방식이 탈락량 대비 85.9%의 부하차단이 이뤄진 반면 새로운 UFR 차단방식은 85.4%로 큰 차이를 보이지 않았으며 최저주파수 값 역시 대동소이한 결과를 보였다. 새롭게 수정한 UFR 방식이 본 연구에서 산정한 제주계통의 가장 severe한 사고에도 주파수 안정화를 이룰 수 있음을 확인하였다.

표 12 기존의 방식과 새로운 방식을 적용한 HVDC 탈락과 남제주TP의 탈락 시뮬레이션 결과비교

Table 12 HVDC & NamJeuTP Trip simulation Results of applying current & UFR Settings

년도	Case	기존의 UFR			새로운 UFR		
		최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	부하 차단량 (MW)	최저 주파수 (Hz)	최대 주파수 (Hz)	부하 차단량 (MW)
2012년	oph200tp	57.56	-	226.2	58.117	-	182.7
	ph200tp	58.338	60.138	276	58.316	-	241.5
	oph150tp	57.973	-	204.45	57.972	60.019	213.15
	ph150tp	58.473	-	205.2	58.349	-	239.4
2013년	oph200tp	57.768	-	211.03	57.853	-	220
	ph200tp	58.398	60.122	282.8	58.397	-	247.45
	oph150tp	58.119	-	180	58.061	-	189
2014년	oph200tp	57.831	-	225.6	57.85	-	235.2
	oph150tp	58.254	-	192	58.138	-	201.6
2015년	oph200tp	57.871	-	235.94	57.946	-	245.98
	oph150tp	58.254	-	199.6	58.145	-	209.58

3. 결론

HVDC의 증설과 다량의 풍력발전기 투입 등 제주지역 전력계통에 큰 변화가 예상되기 때문에 기존의 UFR 차단방식의 적절성을 검토하였다. 제주계통에 발생 가능한 상정사고를 선정하고 주파수 시뮬레이션을 통해 기존의 방식을 분석하였다. 기존 방식이 단계별 주파수 범위와 차단량이 달라 전체적으로 탈락한 발전량 대비 높은 부하차단이 발생하였고 그로 인해 주파수 overshoot 또한 다수 발생하였다. 본 시뮬레이션 결과를 분석하여 기존의 방식을 수정한 방식의 UFR 방식을 제안하였다.

새로운 UFR 방식은 단계별 주파수 범위와 차단비율이 일정한 7단계의 주파수 차단방식이며 새로운 UFR 차단방식을 적용하여 앞서 행한 상정사고에 대한 주파수 시뮬레이션을 진행하였다. 기존의 방식과 새로운 방식은 최저주파수를 비교한 결과 대동소이한 결과를 보였지만 새로운 UFR 차단방식이 더 적은 양의 부하차단을 통해서 주파수 안정화를 이루었고, 발생하는 주파수 overshoot의 빈도와 크기를 감소시켰다. 새로운 주파수 차단방식이 기존의 방식보다 좀 더 효율적인 방식이며 새로운 주파수 차단방식을 통해 세밀한 부하차단이 이뤄졌음을 확인하였고 또한 제주계통의 가장 심각한 상정사고인 HVDC와 남제주TP의 연속적인 탈락에도 주파수 안정화를 이루었다. 새롭게 제안한 UFR 차단방식이 변화하는 제주지역 전력계통에 더욱 효율적인 차단방식이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다(No. 20123010020080).

References

[1] Korea Power Exchange, "The Stable HVDC Lines

- Operating Strategy considering #2 HVDC”,2012.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, “The 5th National Generation Expansion Planning”,2010.02
- [3] PSSE Program Operation Manual, “Appendix H: Governor data sheet”
- [4] PP.M.Anderson, A.A.Fouad,“Power System Control and Stability”, 1999

저 자 소 개



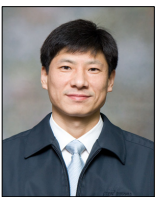
박민수 (朴敏秀)

2006년 홍익대학교를 졸업 후 동대학원에 진학하여 2008년에 석사학위를 취득하였으며 2014년에 박사학위를 취득하였다. 주 연구분야는 전력계통 운영 및 제어이다.



전영환 (全瑩煥)

1983년 서울대학교 졸업 후 동대학원에 진학하여 1985년에 공학 석사학위를 취득하였으며, 1997년 일본 동경대학교에서 공학 박사학위를 취득하였다. 1985년부터 2002년까지 한국전기연구원(KERI)에서 근무하였으며 그 이후 현재는 홍익대학교 전기 전자 공학부에서 정교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 전력계통 운영 및 제어 그리고 계획이다.



변성현 (邊成鉉)

1996년 성균관대학교를 졸업 후 동대학원에 진학하여 1998년에 공학석사학위를 취득하였다. 1998년부터 2001년까지 한국전력공사에서 근무하였으며 그 이후 현재는 한국전력거래소(KPX) 계통보호팀 차장으로 재직 중이다. 주 연구분야는 전력계통보호이다.



양정재 (梁正宰)

1989년 건국대학교에서 전기공학 학사를 취득하였다. 1989년부터 2001년까지 한국전력공사(KEPCO)에서 근무하였으며 그 이후 현재는 한국전력거래소(KPX)의 계통보호팀 팀장으로 재직 중이다. 주 연구분야는 전력계통보호이다.