

## 계통 정보를 이용한 제주-해남간 HVDC 한계 용량 결정 방안

최돈근\*, 강상균, 이병준, 권세혁  
고려대학교

### The Determination of HVDC Limit in the Jeju-Haenam Using System Information

Donkeun Choi\*, Sang-Gyun Kang, Byongjun, Lee, Saehyuk Kwon  
Korea University

**Abstract** - 제주-해남간 전류형 HVDC는 전송되는 유효전력의 일정 비율의 무효전력이 요구되고 있다. 따라서 제주 계통에서의 HVDC는 제주 계통의 무효전력원에 의해 의존해서 용량을 결정할 수밖에 없다. 또한 제주 계통에 대용량 발전기가 투입됨에 따라 발전기 탈락에 따른 부족분의 유효전력량을 HVDC를 통해 공급되고, 추가적인 무효전력이 요구되게 된다. 본 논문은 제주 계통의 무효 전력원을 고려하여 특정 발전기의 운전제약 및 그에 따른 HVDC 전송용량한계를 방안을 제안하고 g-V 해석[5]을 통한 검증을 통해 그 타당성을 확인한다.

#### 1. 서 론

제주 계통은 약 500MW 규모의 독립된 계통으로서 부하의 상당량을 제주-해남간 HVDC를 통해 공급받고 있고, 앞으로도 HVDC 의존도는 더욱 커질 것이다. HVDC를 통해 유효전력을 전송하기 위해서는 정류단과 인버터단에서 DC 전력의 60-70%에 해당하는 무효전력이 계통으로부터 요구된다. 정류단에는 큰 육지 계통에서 충분한 양의 무효전력을 공급받을 수 있으나 인버터단에서는 충분한 무효전력원이 필요하게 된다. 인버터단에서 요구되는 무효전력은 발전기, Switched Capacitor와 동기 조상기에 의해 충당된다.

또한 제주 계통이 점차 커짐에 따라 대용량 발전기가 운전하게 됨에 따라 발전기 탈락 사고를 고려해야 한다. 제주 계통에서의 HVDC는 주과수제어 모드로 운전되기 때문에 발전기 탈락 사고시 발생하는 부족분의 유효전력은 HVDC를 통해 공급되게 된다. 발락하는 발전기의 유효전력량이 많아질수록 계통에서 공급해주어야 하는 무효전력량은 증가하게 되는 것이다.

제주 계통의 안전도유지를 위해 다양한 상정사고(고장용량, 송전선로 상정고장, 발전기 상정고장)를 고려하였고, 그 결과 대용량의 발전기 상정사고시 문제점이 발생하였다. 발전기 사고시 해당 발전기의 유효전력 발생량만큼 HVDC 수전량이 증가하게 되고 HVDC는 증가된 유효전력의 일정부분의 무효전력을 계통으로부터 소모하게 된다. 이 때 계통에 무효전력 공급원이 부족하게 된다면 계통은 붕괴하게 되는 것이다.

이 문제를 해결하기 위해서는 제주 계통에 충분한 무효전력 공급원을 확보하는 방법과 현 계통의 가용 무효전력량을 고려하여 HVDC의 전송 한계량을 결정하는 것이다. 단기간에 충분한 무효전력 공급원을 설치하는 방안은 사실상 불가능하기 때문에 본 논문에서는 보다는 현 계통 상태에서의 무효전력을 고려하여 적절한 운전방안을 찾는 방법을 논할 것이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 무효전력원 분류

제주 계통에서 유효전력 수급 문제는 계통 내의 발전기와 육지 계통에서 제주-해남 HVDC를 통해 문제가 발생하지 않는다고 고려할 때, 무효전력 관점에서 살펴보면 무효전력을 공급하는 요소와 소비하는 요소로 나누어 생각해 볼 수 있다. 계통에 무효 전력을 공급하는 요소로는 계통내의 발전기와 커패시터 그리고 선로의 충전 용량 등이 있다. 무효전력을 소비하는 요소로는 부하와 손실 그리고 HVDC의 무효전력 소비량으로 나눌 수 있다.

$$Q_s = \sum_{i=1}^m Q_{G_i} + \sum_{k=1}^k Q_{C_k} + \sum_{j=1}^l Q_{charj}, \quad Q_c = \sum_{i=1}^n Q_{load_i} + \sum_{k=1}^l Q_{loss_k} + \alpha P_{HVDC}$$

$Q_s$ : 무효전력공급원합,  $Q_{G_i}$ : 발전기 무효전력량,  $Q_{C_k}$ : Shunt Cacitor,  $Q_{charj}$ : 선로 충전용량  
 $Q_c$ : 무효전력소비원합,  $Q_{load_i}$ : 부하의 무효전력량,  $Q_{loss_k}$ : 선로 무효전력손실,  $\alpha$ : HVDC의 Q/P  
 $k$ : Shunt Cacitor 수,  $m$ : 발전기 수,  $\alpha$ : HVDC에서 Q/P,  $n$ : 선로 수

##### 2.1.1 가용 무효전력 지수

무효전력의 국부적 특성을 고려할 때 제주 계통의 가용 무효전력 공급원은 항상 무효전력 소비원보다 크게 된다.(1)

$$Q_{index} = \frac{Q_c}{Q_{s,max}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{load_i} + \sum_{k=1}^l Q_{loss_k} + \alpha P_{HVDC}}{\sum_{i=1}^m Q_{G,max} + \sum_{k=1}^k Q_{C_k} + \sum_{j=1}^l Q_{charj}} < 1 \quad (1)$$

현재의 운전점에서 고려해 볼 때 손실과 충전용량등을 고려해서 무효전력 수급은 균형을 이루고 있다. 대용량 발전기의 탈락 상정사고 시에는 선로에서의 무효전력 손실, 충전용량의 변화는 크지 않고, 부하량, Shunt Capacitor량은 고정되어 있다면 무효전력 가용 용량의 변화는 탈락된 발전기의 한계 값이 되고(2), 소비원 측면에서는 탈락 발전기의 유효전력량에  $\alpha$  값을 곱한 값이 된다. (3)

$$\Delta Q_{s,max} \approx - Q_{Gdropped,max} \quad (2)$$

$$\Delta Q_c \approx \alpha \times \Delta P_{HVDC} = (\alpha \times \Delta P_{G_{dropped}}) \quad (3)$$

따라서 발전기 탈락 후에 식(1)은 (4)로 나타낼 수 있다

$$Q_{index,new} = \frac{Q_{c,new}}{Q_{s,max,new}} \approx \frac{Q_{c,initial} + \Delta Q_c}{Q_{s,max,initial} + \Delta Q_{s,max}} \quad (4)$$

식(4)를 살펴보면 탈락 발전기의 P출력값이 클수록 HVDC 전송량은 증가되고, Q의 한계값이 클수록 계통 전체의 무효전력량을 작게 만들게 되므로 가용 무효전력 지수를 크게 만들어 계통을 불안정하게 함을 알 수 있다.

##### 2.1.2 사례연구

본 논문에서는 2006년 Peak시 제주 계통의 가용 무효 전력 지수를 계산하고 발전기 탈락 사고시의 지수를 계산하여 1이 넘는 경우 1이하가 되는 적정 운전조건을 계산하여 HVDC 한계 용량을 결정하였다.

- 탈락 발전기 : 제주 TP#2(Pg=57MW, Qmax=35MVar)  
남제주#3TP(Pg=95MW, Qmax=48MVar)

- $\alpha$  : 약 0.6(PSS/e), 약 0.7(실측값)

<표 1> 2006년 제주 Peak 계통의  $Q_{index}$

	$\Delta Q_{s,max}$	$\Delta Q_c$	$Q_{index,0.6}$	$Q_{index,0.7}$
BaseCase			0.774	0.809
제주TP#2 탈락	-35	39.9	0.929	0.943
남제주#3TP 탈락	-48	66.5	1.02	1.045

각 CASE를 보면 남제주 #3의 탈락의 경우 가용 무효전력 지수가 1이 상임을 확인 할 수 있다. 즉 발전기 탈락시의 계통에서는 무효전력 수급이 맞지 않음을 확인 할 수 있다. 이 경우  $Q_{index}$ 가 1이하에서 운전하기 위해서는 남제주 #3 발전량을 약 71MW(Ka=0.7인 경우)로 제한하여야 한다. 즉 현 계통 상태에서 남제주#3TP 발전기 탈락 상정 사고를 고려하면 HVDC를 통해 전송가능한 양의 한계점은 150+71=221MW임을 확인 할 수 있다.

## 2.2 g-V 해석을 통한 검증

발전기 상정고장의 경우 계통에 stress를 주는 원인은 해당 발전기의 유효전력 및 무효전력 공급능력의 상실이라고 생각할 수 있다. 따라서 해당 발전기의 발전력을 파라미터( $\lambda$ )화 하고  $\lambda$ 가 변함에 따라 계통의 상태 변화를 분석하였다.  $\lambda$ 가 0이라는 것은 사고이전의 계통 상태를 나타내고,  $\lambda$ 가 1이라는 것은 상정고장 이후의 상태를 나타낸다. 따라서 발전기 상정고장 검토시  $\lambda$ 가 1보다 큰 경우에 해가 존재한다면 상정고장 이후에도 해가 존재하기 때문에 계통이 안정하다고 판단할 수 있고, 만일  $\lambda$ 가 1보다 작은 경우에 전압 불안정점[3]이 존재한다면 계통이 불안정하다고 판단할 수 있다. 이 경우 전압 불안정점이 어디에 위치하는가에 따라 해를 수립시키기 위한 발전기 출력 제한 값을 찾을 수 있고, 또한 전압 불안정점에서의 참여인수의 정보를 통해 계통에 문제가 되는 원인 및 대책 방안을 생각할 수 있을 것이다.

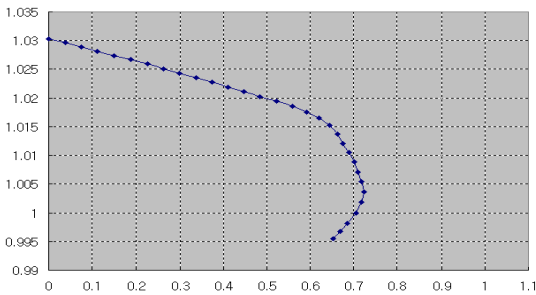
### 2.2.1 제주 계통에서의 발전기 상정고장 해석

g-V 해석방법을 이용하여 제주계통에서 발전기 상정고장을 검토하였다. (그림 1) 제주 TP#2 발전기( $P_{G0}=57\text{MW}$ )가 탈락하는 경우  $\lambda$ 가 1인 경우 해가 존재하기 때문에 안정하다고 판단할 수 있다. 그림 1(b)에서 남제주#3TP 발전기( $P_{G0}=95\text{MW}$ ) 탈락시  $\lambda$ 가 1인 경우 해가 존재하지 않는다. 발전기 탈락시 불안정한 경우(그림 1(b)) 계통의 안정화를 위해서 다음 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 하나는 해당 발전기의 출력값( $P_{G0}$ )을 감소시켜 사고의 정도( $\lambda$ )를 줄이는 방법이고, 다른 하나는 무효전력원을 계통에 투입하여 g-V curve가 오른쪽으로 shift하여  $\lambda$ 가 1인 경우에도 해가 존재하도록 하는 방법이다.

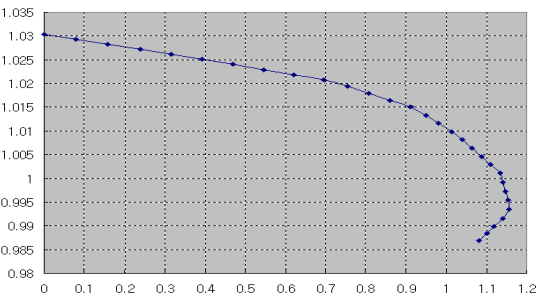
본 논문에서는 기존에 설치되어 있는 설비를 최대한 이용하여 안정도 조건을 만족시키는 방법에 관심이 있기 때문에, 첫 번째 방법(발전기 출력을 감소시키는 방법)을 이용하여 안정도 조건을 만족시키기 위한 발전기의 새로운 최대 유효전력 출력값( $P_{G\text{max}*}$ )을 찾았다. g-V 해석에서 사고가  $\lambda_{\text{max}}$  만큼 진행되는 동안까지는 해가 존재하기 때문에 발전기의 새로운 최대 출력값은 (5)이라고 판단할 수 있다.

$$P_{G\text{max}*} = \lambda \times P_{G\text{max}0} \quad (5)$$

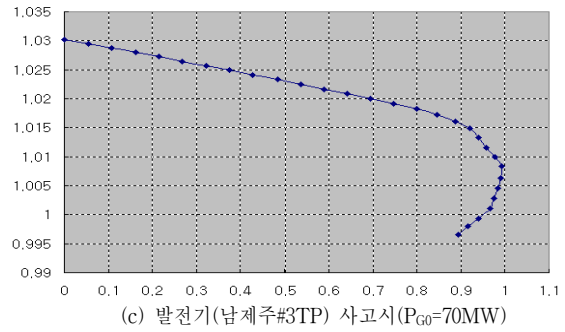
따라서, 95MW로 운전하던 발전기의 용량은 계통의 안전도 유지를 위해 약 70MW( $95 \times 0.73$ )로 운전해야 한다. 남제주#3TP의 운전용량을 95MW에서 70MW로 감발후 g-V 해석을 했다. 그림1(c)에서 확인하면 발전기제약 운전시 계통이 안전함을 확인할 수 있다. 안전도 제약으로 위험 발전기를 70MW로 운전하는 경우 부족한 유효전력은 제주 계통내의 다른 발전기들이 공급해야 한다.



(a) 발전기(제주TP#2) 사고시( $P_{G0}=57\text{MW}$ )



(b) 발전기(남제주#3TP) 사고시( $P_{G0}=95\text{MW}$ )



(c) 발전기(남제주#3TP) 사고시( $P_{G0}=70\text{MW}$ )

<그림 1> g-V 상정고장 해석 결과

## 3. 결 론

제주 계통에서 발전기 상정 고장이 발생하는 안전도 제약문제를 통해 가장 중요한 유효전력 공급원인 HVDC와 대용량 발전기의 제약 운전에 대해 살펴보았다. 첫째 방법은 제주 내의 무효전력원을 지수화 하여 그 값이 1이하를 만족하도록 하는 방안을 고려하였고, 그 결과물은 발전기 유효전력을 파라미터화 하는 g-V해석 방법[5]을 이용하여 검증하였다. 논문에서의 제약은 기투입되어 있는 장비만을 고려하였다. 계통의 무효전력을 고려한 가용무효전력 지수를 이용한 결과와 g-V 해석을 통해 동일한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 두 결과를 이용하여 대용량 발전기의 제약 운전량과 그에 따른 HVDC 한계용량을 정할 수 있다. 앞으로 현 계통에서 이용 가능한 장비를 추가 투입하여 제약을 해소하기 위한 연구가 추가적으로 요구된다. 또한 미래의 계통변화에 따른 제약해소 방안 연구가 필요하다.

## [참 고 문 헌]

- [1] V.Ajjarapu and C. Christy, "The continuation power flow: A tool for steady-state voltage stability analysis", IEEE Trans. Power Syst., vol 7, pp. 416-423, Feb. 1992
- [2] C. A. Canizares and F.L.Alvarado, " Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems," IEEE Trans. Power Syst, vol. 8, pp.1-8, Feb. 1993
- [3] C. W. Taylor, Power System Voltage Stability. New York: McGraw Hill, 1994
- [4] P.Kunder, Power System Stability and Control. New York: McGraw Hill, 1994
- [5] Sang-Gyun Kang, Sang-Soo Seo, Byoungjun Lee, Joon-Young Joo, Joo-Cheon Bae, "A STUDY ON DETERMINATION OF PG LIMITATION IN THE JEJU SYSTEM USING GENERATION CONTINUATION POWER FLOW (GCPF)", CIGRE2007 conference
- [6] PSS/E 30.2 USERS MANUAL