

### Power Tracing을 이용한 VSC HVDC 설치위치 선정

오세승  
서울대학교 BK21 정보기술사업단

장길수  
고려대학교

문승일  
서울대학교

### VSC HVDC Site Selection Using Power Tracing

Oh, Sea Seung  
SNU BK21 Research Division for IT

Jang, Gilsoo  
Korea University

Moon, Seungil  
Seoul National University

**Abstract** - This paper presents a HVDC site selection algorithm to increase transfer capability using VSC HVDC system which can control active power as well as reactive power.

Using normal powerflow results and simple index  $k$ , the HVDC site selection algorithm is enhanced and more tightly-coupled transmission lines are identified in a domain of generators.

#### 1. 서 론

우리나라와 같이 주요 부하집중지와 발전단이 멀리 떨어져 있고 입지 수용성의 악화로 인하여 발전단지의 대용량화가 진행되는 계통에서는 필연적으로 전압안정도와 같은 안정도 제약조건에 의하여 부하집중지로의 송전용량이 제한되며 이는 전체 송전선로의 열용량 보다 작게 된다.

물리적인 계통에 남아 있는 송전능력의 평가기준으로 가용송전용량(Available Transfer Capability, ATC)을 사용하며 이는 수직통합체제에서는 안정도 마진의 기준으로 시장체제에서는 전력거래에 사용할 수 있는 송전용량을 의미한다.[1]

ATC는 계통 부하가 증가하면서 부하율이 높은 송전선로나 전압이 낮은 모선에 의해 결정되기 때문에 ATC 증대를 위한 방법으로 발전력 재배치나 발전기와 OLTC를 이용한 단자전압 조절 등이 이용되어 왔다.[2] 선로 리액턴스, 전압의 크기와 위상각을 제어하여 조류를 제어할 수 있는 FACTS 기기가 등장하면서 FACTS를 이용하여 ATC를 증대시키는 방식이 연구되어 왔다.[3, 4]

FACTS 설치위치 선정 방법은 주로 감도해석을 통해 이루어져 왔으며, 이와는 다르게 power tracing 기법을 이용한 설치위치 선정 방법도 제안되었다.[5] Power tracing은 시장 체제 하에서 송전가격 산정, 손실비용 산정, 혼잡관리, 보조서비스 등을 위해 전력의 흐름을 추적하는 기법이다.[6]

본 논문에서는 간단한 지수를 이용하여 기존의 알고리즘을 보완한 전압형 HVDC 설치위치 선정 알고리즘을 제안하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 The VSC HVDC Site selection Algorithm

Radial 계통의 선로 중간지점에 VSC HVDC를 설치하면 선로 리액턴스를 절반으로 줄인 것과 같은 효과가 있기 때문에 송전선의 전송량을 증가시킬 수 있다.[7] 그러나 mesh화 되어 있는 실계통에 대해서 radial 계통에서와 같은 효과적인 적용위치를 찾기 어렵기 때문에 power tracing을 이용하여 계통을 여러 zone으로 나누고 하나의 zone내 또는 중첩된 zone 간의 교류송전선의 대

계 안으로 VSC HVDC시스템의 설치위치를 선정하는 방법이 제안되었다.[5]

Zone 설정은 기존에 제안된 방법을 따르며 zone의 경계를 선로조류 100MW로 설정하여 기존의 zone보다 좀더 세밀한 zone이 설정되었다. 이 설정값은 부하 수준, HVDC시스템의 용량에 맞추어 계산되어야 한다.

Python API를 사용하여 PSS/E의 기능을 이용한 발전기의 domain을 계산하는 프로그램을 구현 하였으며 기 개발된 전력계통 시각화 프로그램[8]을 이용하여 수도권의 발전기 domain을 그림 1.과 같이 시각화 하였다.

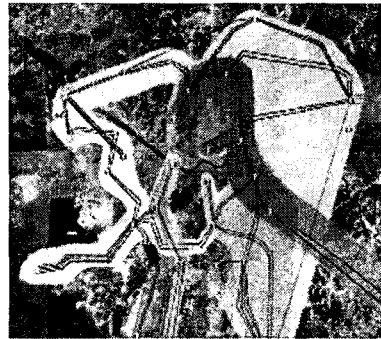


그림 1. 수도권의 발전기 domain

그림 1.에서 보이듯이 부하 집중지역인 수도권은 크게 6개의 domain으로 나눌 수 있으며 발전단의 지리적 위치에 따라 그림 2. 와 같이 두 가지로 분류할 수 있다.



그림 2. 수도권의 발전기 domain의 위치에 따른 분류

수도권의 발전기는 수도권 환상망을 통해 모든 부하단에 영향을 미치고 있으며 비수도권의 발전기가 주전원인 domain의 부하모선들은 주로 수도권의 동부권 domain에 포함하고 있다. 비수도권의 발전기들은 수도권 발전기들에 비해 경제성이 높기 때문에 비수도권 지역으로부터의 송전계약을 완화할 수 있다면 전체시스템의 경제성을 높일 수 있게 된다.

비수도권 발전기들과 수도권의 부하집중지 사이의 수송능력을 증가시키기 위한 전압형 HVDC 설치위치를 그림 1의 오른쪽 4개 domain들 중에서 선정하였다.

정류기단 설치 위치는 선정된 zone의 345kV 이상 모선 중 zone 내에 주요 발전단지가 하나일 경우 발전단지의 전력이 가장 많이 유입되는 모선을 선정하고 zone 내에 발전단지가 다수일 경우 zone에서 출력이 가장 큰 발전단지의 전력이 가장 많이 유입되는 모선을 정류기단 설치 후보지역으로 선정하였다. 이렇게 함으로써 발전단지 및 부하단사이의 교류송전선에 대해 송전루트를 만들어 송전량을 효과적으로 분산시킬 수 있게 되어 계통의 송전능력을 증가시킬 수 있게 된다.

Inverter station의 설치위치를 결정하기 위하여 proportional sharing assumption[9]에 근거한 지수  $k_r$  을 정의하였다. 지수  $k_r$ 은 특정 domain에서 조류의 양과 방향을 파악하여 mesh 망에서 방사성(radial-like)이 높은 연속된 송전선로들의 집합을 찾아내는데 사용된다.

모선  $j$ 의 조류가 그림 3과 같을 때,

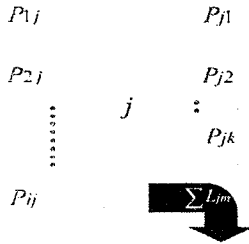


그림 3. 모선  $j$ 의 조류흐름

지수  $k_r$ 은 다음과 같이 정의 된다.

$$k_r = \left| \frac{P_{aj} \times \sum_{i=1}^n P_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{ij} \times \sum_{k=1}^m P_{jk} + \sum_{m=1}^m L_{jm}} \right|$$

지수  $k_r$ 은 1에 가까울수록 방사계통에 가깝다는 것을 의미한다.

$k_r$ 을 그림 1의 domain에 적용하면 각 domain들은 그림 5와 같이 재정의 되며 수도권의 오른쪽부분은 5개의 준방사계통(quasi-radial lines)으로 정의할 수 있다.

이 5개 준방사계통의 접점은 모선1600이며 inverter station의 입지 수용성들을 고려할 때 모선1700도 inverter station의 설치위치로 고려하였다.

Rectifier station은 inverter station의 위치를 정한 후 inverter station과 같은 준방사계통내에 있는 발전단 중 하나를 선택하였다.

PV분석과 과도안정도 분석을 이용하여 설치후보지에 전압형 HVDC를 설치한 효과를 기존의 설치위치와 비교 분석하였다.



그림 5.  $k_r$ 을 이용한 domain

표 1. HVDC 설치후보 모선

	Candidate sites
Rectifier	4800, 5750
Inverter	1600, 1700

## 2.2 PV분석을 통한 설치위치 유효성 검증

PV 분석을 통해 유효전력마진이 가장 큰 설치위치는 모선5750과 모선 1500에 전압원 HVDC를 설치하는 경우이며 계통손실도 전압원 HVDC가 없는 경우보다 더 적은 것으로 모의되었다.

표 2. 유효전력마진과 계통 손실비교

Rectifier	Inverter	HVDC rating		Incremental P(MW)	Loss(MW)	Distance (km)
		P (MW)	Q (MVAR)			
-	-	-	-	937	1000	-
5750	1600	300	200	1431	996	97
5750	1700	300	200	1431	996	92
4100	4700	300	200	1362	1007	30
4800	1400	300	200	1387	1003	98
4800	1500	300	200	1362	1002	99
4800	1600	300	200	1418	1002	80
4800	1700	300	200	1412	1002	80
4800	1800	300	200	1392	999	92
4800	1900	300	200	1381	1001	113
4800	2500	300	200	1400	1003	69
4600	1800	300	200	1356	986	40
6950	4100	300	200	1331	983	36

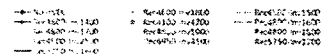
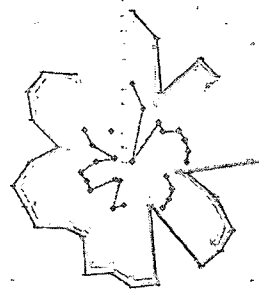


그림 5. 상정고장 시 유효전력 마진비교

상정고장 시 유효전력마진은 상정고장순위결정 알고리즘을 통해 가장 심각한 상정고장 30개를 선정 한 후 각각의 상정고장 시 유효전력 마진을 PV분석을 통해 산정하였다.

전압원 HVDC 시스템이 계통에 미치는 과도안정도 영향 평가도 이루어졌으며 모든 상정고장에 대해 기본계통보다 안정도가 향상되는 것으로 모의 되었다.

전압원 HVDC의 정격을 600MW로 증가시켜 위의 알고리즘을 적용한 후 유효전력마진을 비교한 결과가 표 3.이며 HVDC의 정격이 300MW일 때보다 증가하였으나 정격을 두배로 증가시키는데 소요되는 비용을 고려해 볼 때 정격을 증가시키는 것은 경제성이 낮다고 볼 수 있다.

표 3. 전압원 HVDC의 정격에 따른 유효전력마진

Rectifier bus	Inverter bus	P margin		System loss		Direct distance (km)
		300 (MW)	600 (MW)	300 (MW)	600 (MW)	
-	-	937	937	1000	1000	-
5750	1600	1431	1506	996	995	97
5750	1700	1431	1500	996	996	92
4100	4700	1362	1382	1007	1010	30
4800	1400	1387	1443	1003	1000	98
4800	1500	1362	1462	1002	1002	99
4800	1600	1418	1475	1002	1002	80
4800	1700	1412	1462	1002	1003	80
4800	1800	1392	1450	999	998	92
4800	1900	1381	1425	1001	1002	113
4800	2500	1400	1444	1003	1004	69
4600	1800	1356	1425	986	984	40
6950	4100	1331	1394	983	986	36

### 3. 결 론

본 논문에서는  $k_r$  지수를 proportional sharing assumption을 기반으로 정의하였고 이를 이용하여 발전기 domain내에서 전기적으로 강하게 커플링된 송전선로들을 파악하였다. 이러한 송전선로의 양끝단에 전압원 HVDC를 설치한 후 PV 분석과 상정고장 분석을 통해 정태안정도와 과도안정도 평가를 통하여 선정된 설치 위치가 수송능력의 증가와 더불어 과도안정도 개선효과도 있음을 확인하였다.

- [1] North American Electric Reliability Council(NERC), "Available transfer capability definition and determination," Rep., June 1996.
- [2] Y. Dai, J. D. McCalley, and V. Vittal, "Simplification, expansion and enhancement of direct interior point algorithm for power system maximum loadability," in Proc. 21st Int. Conf. Power Ind. Comput. Applicat., 1999, pp. 170-179.
- [3] Ying Xiao; Song, Y.H.; Chen-Ching Liu; Sun, Y.Z., "Available transfer capability enhancement using FACTS devices," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, Issue 1, Feb. 2003 pp 305-312
- [4] B. A. Renz, A. Keri, A.S. Mehraban, C. Schauer, E. Stacey, L. Kovalsky, L. Gyugyi, A. Edris, "AEP Unified Power Flow Controller Performance," IEEE Trans, on PD, vol.14, no4, Oct. 1999 pp1374-1381.
- [5] 오세승, 장길수, 한병문, 차준민, "전압원 HVDC를 이용한 부하집중지로의 송전용량 증대방안," 대한전기학회논문지 55A권 6호, pp. 236-242, 2006년 6월
- [6] Rosado, S.P.; Abdel-Rahman, K.; HadjSaid, N.; "Tracing the Path of Electric Power Flow - A Study for Deregulated Power Systems" IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. Volume 3, Jan. 2001
- [7] Huang, Z.; Ooi, B.T.; Dessaint, L.-A.; Galiana, F.D.; "Exploiting Voltage Support of Voltage-source HVDC," IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Volume 150, Issue 2, March 2003
- [8] 오세승, 장길수, "Power Tracking 시각화 프로그램 개발" 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, Nov. 2006
- [9] J. Bialek, "Tracing the flow of electricity," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, vol. 143, pp. 313-320, 1996.