

Well-being기법을 이용한 해남-제주간 HVDC System 신뢰도평가

손현일* · 이효상** · 신동준*** · 김진오*
 *한양대학교 전기공학과, **전력거래소, ***한국전기연구원

Reliability Assessment in Hea-nam Cheju HVDC system using Well-being Method

Hyun-Il Son* · Hyo-Sang Lee** · Dong-Joon Shin*** · Jin-O Kim*
 Dept. of EE. Hanyang University*, KPX**, KERI***

Abstract - In a new competitive market environment, it is very important to determine how much power can be transferred through the network. It's known as Available Transfer Capability(ATC). This paper presents a technique to evaluate Reliability Assessment and the Available Transfer Capability of Haenam-Cheju HVDC transmission system using Well-being Method which is based on the probabilistic method. The system Well-being is categorized in terms of the system Healthy and Marginal in addition to the conventional Risk index. Haenam-Cheju HVDC system has been studied for the optimal ATC based in well-being categories.

성을 고려하여 전력계통의 안정적인 운영을 보장하기 위해 필요한 양이고 설비편의여유도(CBM)는 발전설비 신뢰도 기준을 만족시키기 위해 필요한 양이다. 가용송전 용량계산은 다음과 같다[1,2].

$$TTC = \min \{ \text{Thermal, Voltage, Stability Limit} \} \quad (1)$$

$$ATC = TCC - TRM - CBM \quad (2)$$

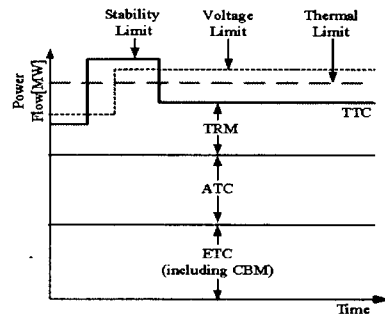


그림 1. TTC와 ATC

1. 서 론

전력산업이 구조 개편됨에 따라 전력거래에 참여하는 모든 전력회사의 경제성과 효율성이 강조되고 있다. 또한, 구조개편에 따른 시장경제논리를 반영한 급전방식의 도입으로 인해 전력회사는 자사의 이익 극대화라는 시장 논리에 따라 효율적인 발전기 운영방안을 생각하지 않을 수 없게 되었다. 과거 중앙 집중적인 급전체제에서는 계통전체의 안정성과 경제성을 동시에 고려하여 운영되어 왔지만, 발전회사 분리로 인해 개별 사업자의 이익이 우선되는 환경으로 전환되었다. 따라서 송전망을 안정적으로 운용하면서 상업적 이용을 확대하기 위하여, 기존에 사용하고 있는 용량에 추가적으로 사용할 수 있는 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)의 중요성이 확대되고 있다. 가용송전용량이란 송전계통에 주어진 시간동안 사용하지 않고 남아있는 용량을 측정하는 것이다. 가용송전용량의 계산은 계통과 시장의 불확실성으로 인해 매우 복잡하고 어려운 문제이다.

따라서 본 논문에서는 Well-being 평가기법을 전력시스템에서의 신뢰도산정과 가용송전용량 계산에 적용할 것을 제안하였다. 위의 기법은 확률적 접근기법을 기본으로, 신뢰도평가를 통해 가용송전용량 결정할 수 있는 특성이 있다. 이 제안한 기법의 효율성을 입증하기 위한 2003년도 6월 해남-제주간 HVDC System를 통해 사례 연구를 수행하였으며 Well-being 지수를 만족하는 송전용량을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 가용송전용량 결정

NERC Definition에 따르면 가용송전용량(ATC)은 송전선을 안정적으로 운용하면서 상업적 이용을 확대하기 위하여, 기존에 사용되고 있는 용량에 추가적으로 사용할 수 있는 송전용량이다. 그림 1에서처럼 전체송전용량(TTC)은 한 지역에서 다른 지역으로 계통 안정도의 위반 없이 안전하게 송전할 수 있는 최대 송전량이다. TTC를 결정하는 요소에는 계통 조건, 주요 상정사고 등이 있다. 송전신뢰도 여유도(TRM)은 계통의 불확실

2.2 신뢰도의 개념

전력시스템은 매우 복잡한 시스템이다. 이것은 많은 요소들, 즉 다양한 크기와 기능을 가진 구성요소간의 유기적 결합으로 이루어진 시스템이기 때문이다. 그러므로 전력시스템은 확실적인 특성을 보이고 있다. 그러한 시스템에 대한 가정은 확실적인 특성에 의해 기반을 두어야 한다. 30년전부터 그러한 확률을 이용한 기법들이 연구되어 왔으며, 많은 전력시스템의 모델, 기법, 신뢰도 산정에 따른 응용들이 속속 연구되어 왔다.

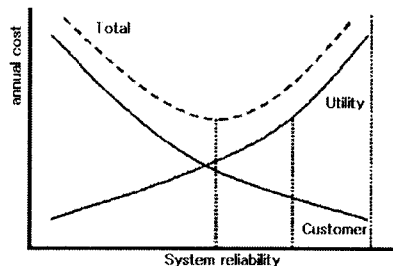


그림 2 전체 신뢰도 비용

전력시스템 계획에 있어 가장 중요한 문제는 공급예비력을 정확하게 결정하는 것이다. 공급예비력이 너무 적으면 정전이 빈번하게 발생하며, 공급예비력이 너무 많으면 비용이 과도하게 지출된다.

그림 1은 신뢰도에 따른 전력공급회사와 소비자의 비

용을 나타낸 것이다. 소비자에게 신뢰도 높은 전력을 공급을 하면, 전체 비용이 높아지며, 신뢰도가 낮은 전력을 공급을 하면, 정전비용이 발생하므로 역시 비용이 높다. 이 둘을 적절하게 조절하여, 전체 시스템의 신뢰도를 규정을 만족시키며, 낮은 비용을 사용하여야 한다.

2.3 Well-being 평가법

전력시스템은 확률적인 특성을 보이고 있는 많은 요소들이 유기적으로 결합된 매우 복잡한 시스템이다. 따라서 전력시스템 계획에 있어 가장 중요한 문제는 공급예비력을 정확하게 결정하는 것이다. 공급예비력이 너무 많으면 정전이 빈번하게 발생하며, 공급예비력이 너무 많으면 비용이 과도하게 지출된다[3,5].

EPRI의 보고서는 전반적인 전력시스템의 운영 성능을 특정 신뢰도 지수의 위반 여부를 기준으로 구분한 운영상태 평가 체계를 제시하였다. 이러한 시스템 운영상태 구분은 필요이상으로 세분되어 있으므로 시스템 Well-Being 상태를 Healthy, Marginal, 그리고 At Risk의 3가지 상태로 구분하여 그림 3과 같이 Well-Being 상태로 평가하였다.

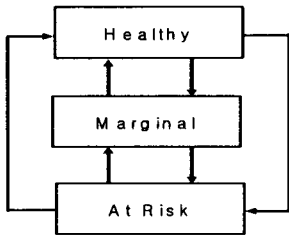


그림 3 Well-Being 평가 체계

그림 3에 나타난 운영상태 Diagram에서 알 수 있듯이 시스템의 운영상태를 Normal, Alert, Emergency 와 Extreme Emergency로 구분하여 평가하였다.

각 단계의 정의를 정리하면 다음과 같다.

Healthy State

: 모든 설비와 운영제한조건이 모두 제한치 안으로 유지되고 있는 상태이며, 어떠한 단일 설비의 고장이 발생한다 하더라도 모든 제약조건이 제한치 안으로 유지될 수 있는 충분한 공급예비력이나 예비 설비가 있어야 한다.

Marginal State

: 모든 운영제한조건이 제한치 안으로 유지되고 있다는 점은 Healthy state와 비슷하다. 하지만 단일 상정사고에 대비할 수 있는 공급예비력이나 예비 설비는 없는 상태로 정의된다.

At Risk State

: Marginal state에서 복구 동작이전에 부하가 추가적으로 증가하거나 다른 설비의 고장이 발생할 경우 시스템은 At Risk 상태가 된다. 이때 운영제한조건의 위반이나 부하 차단이 발생할 수 있다.

연계선로의 Well-Being 상태를 측정하는 과정은 At Risk 상태를 평가하는 것으로 시작된다. 시스템에서 상정사고가 발생할 경우 그 결과로 시스템은 대부분 At Risk 상태나 Marginal 상태로 천이한다. 고려 가능한 상정사고에 대한 영향 평가 및 발생확률을 고려하여 At Risk 상태 발생확률 P_r 을 계산한 후 Healthy 상태 발생확률 P_h 를 계산한다. 부하가 일정한 상태일 경우 3가지 Well-Being 상태의 발생 확률은 1 이므로 Marginal 상태 확률 P_m 은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_m = 1 - (P_h + P_r) \quad (3)$$

2.3.1 Well-being 평가기법을 이용한 송전용량 계산방법

3장에서 설명한 바와 같이 Healthy영역은 모든 설비와 운영제한조건이 모두 제한치 안으로 유지되고 있는 상태이며, Marginal영역은 단일 상정사고에 대비할 수 있는 공급예비력이나 예비 설비는 없는 상태이다[4].

연계선로에 의해 공급되는 전력은 전력시스템의 운영규칙이나 시스템 오퍼레이터의 판단에 의해 Healthy영역의 외곽선의 상태확률인 Well-being 지수를 결정하게 되며, 이를 따라 송전량이 결정하게 되며, 공급예비력이 없이 전력을 송전하는 경우는 Well-being 지수로 송전용량을 결정하고 송전량을 증가시킬 수 있다.

시스템 각 구성요소들의 상태확률로 이루어지는 각 영역에 대한 상태확률인 Well-being 지수는 다음과 같은 방법으로 산정할 수 있다.

- 1) 전력시스템의 각 구성요소들의 상태확률에 대해 파악한다. 각 구성요소들의 상태확률은 다음과 같이 표시된다.

$T_1, T_2, T_3, \dots, T_l$: l 은 전체 시스템 구성요소의 수

- 2) 식 (4)를 이용하여 Risk상태의 상태확률을 계산한다.

$$P_r = 1 - P\left(\bigcup_{i=1}^l T_i\right) \quad (4)$$

- 3) 각 구성요소들의 상태확률의 제품형태를 취한다. Healthy상태는 식 (5)와 같이 각 상태확률의 누적 합으로 계산한다.

$$P_h = P\left(\bigcup_{j=1}^j T_j^2\right) \quad (5)$$

- 4) Marginal영역의 상태확률은 다음 식 (6)을 이용한다.

$$P_m = P\left(\bigcup_{i=1}^l T_i\right) - P\left(\bigcup_{j=1}^j T_j^2\right) \quad (6)$$

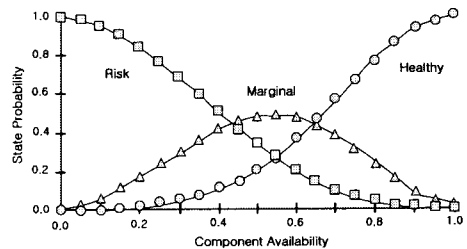


그림 4 운영상태 상태확률

이를 통해 얻어진 각 상태확률들은 그 시스템, 혹은 연계선로의 선로정격에 대한 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 가로축은 정격대비 송전용량이 되겠으며, 세로축은 그 송전량에 대한 상태확률을 의미한다.

3. 사례 연구

Well-being 평가기법은 시스템의 신뢰도를 고려한

방법이다. HVDC 송전선로를 포함한 시스템의 상태를 세 가지 상태(Healthy, Marginal, Risk)로 구분하여, HVDC 송전량 변화에 따른 각 상태의 발생 확률을 구한 후 시스템의 안전도를 판별하여 해남-제주간 HVDC 선로의 가용송전용량을 결정하였다.

3.1 HVDC 및 제주 계통 신뢰도 평가

해남-제주 HVDC 시스템은 1998년 3월부터 상용서비스를 시작하였다. 그림 5는 HVDC 시스템에서 과거 발생한 상정사고 시간을 그래프화 하였다. 사고는 매년 감소하였으며, 1999년 어선에 의해 HVDC 선로 1회선이 절단당하는 사고로 약 160시간 동안 사고가 지속된 것을 제외하고는 제주-해남간 계통불안정이나, 동기조상기의 계통탈락으로 인한 사고들이었으며, 사고시간 역시 순간고장에서부터 하루 정도의 시간 내에 HVDC 계통은 복구가 되었다. 또한 시스템 운영이 안정화 된 2001년도 이후에는 사고 시간이 크게 줄은 점을 알 수 있다. 표 1에 본 연구에 적용된 HVDC 시스템의 신뢰도 데이터를 정리하였다.

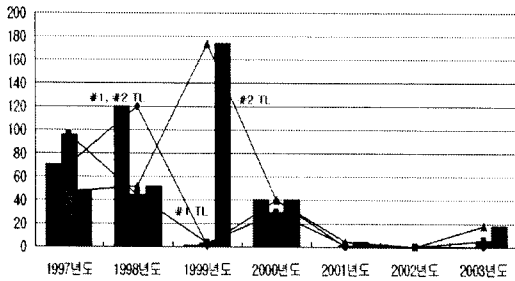


그림 5 HVDC선로 상정사고 시간

표 1. 해남-제주간 HVDC선로의 신뢰도평가결과

구분	고장 회전수	고장횟수 (회/년)	등가고장 시간 (hour)	이용불가능률 (%) (연평균 고장시간)	이용가능률 (%)	고장전여회전수
HVDC	1	12.2	31.003	4.935 (432.31시간)	95.065%	1
	2	2.8	27.081	0.053 (4.642시간)	99.947%	0

3.2 Well-being 평가기법의 결과

HVDC 선로를 통한 송전량을 단계적으로 증가시키며 HVDC 선로와 제주 시스템의 상태를 평가하였다. 그림 6은 HVDC 선로의 가용도에 따른 Healthy, Marginal, Risk 상태의 확률분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 x 축은 HVDC 선로의 가용도를 나타내고 있으며 가용도가 높아질수록(송전량이 적어질수록) Risk 상태 발생 확률이 줄어들며 반대로 Healthy 상태 발생 확률이 증가함을 알 수 있다. Risk 상태 발생 확률은 HVDC 선로의 가용도가 0.4를 넘어서며 급격하게 감소하고 있다.

Well-being 평가 기법에서 Healthy, Marginal, Risk 상태의 발생 확률을 모두 더하면 1이 되므로 각 상태의 발생확률을 누적시켜 시스템 Well-being 상태를 파악할 경우 송전용량 변화에 따른 상태 변화를 좀 더 용이하게 파악할 수 있다. 그림 7에 세 가지 상태의 누적 확률을 송전용량 변화에 따라 분석한 그래프를 나타내었다. 송전용량이 증가함에 따라 Risk 영역이 증가하고 있으며 송전용량이 약 170~180 MW에 도달하면 Risk 영역이 0.5에 도달함을 알 수 있다.

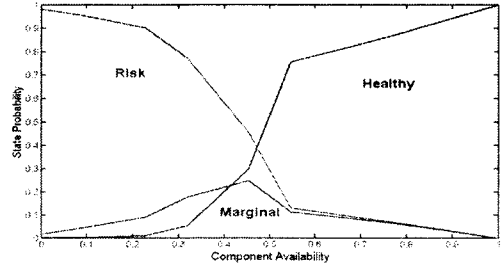


그림 6 HVDC 사용용량별 시스템상태확률

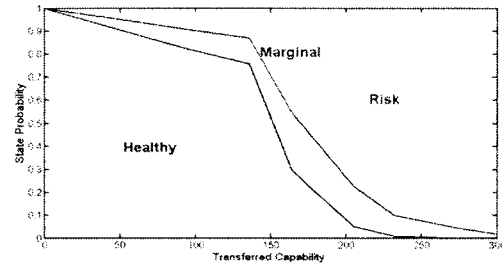


그림 7 수전량별 시스템상태확률

4. 결 론

본 논문에서는 Well-being 평가기법을 이용하여 신뢰도조건을 만족시키는 송전용량을 계산하였다. 상태확률이 0.5가 되는 지점에서는 각 송전제한량을 결정한다면 HVDC송전용량은 150~175 MW로써 결정이 된다. 물론 시스템 운영 규정이 좀더 엄격하다면(Risk 상태지수가 0.5미만인 지점에서 결정된다면) 더 적은 송전용량이 결정될 것이다. 즉, 사스팀 운영규정과 시스템 오피레이터의 판단에 의해 송전용량 제한이 결정될 것이지만, 지수라는 지표를 통해 합리적인 기준을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

육지의 일반 송전선로의 경우와 다르게 매우 고가의 건설비용을 보이는 해저 HVDC 선로의 경우 기존의 결정론적 N-1 상정사고 기준을 일괄적으로 적용하기 보다는 사고확률 및 복구시간과 정전비용 등 다양한 변수를 함께 고려할 수 있는 새로운 가용송전용량 결정 기준을 고려해 보아야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구(F01-2003-000-00073-0)지원에 의해 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] North American Electrician Reliability Council (NERC), "Available Transfer Capability -Definitions and Determinations", NERC Report, June 1996.
- [2] North American Electrician Reliability Council (NERC), "Transmission Transfer Capability", NERC Report, May 1995.
- [3] R. Billinton, S. Aboreshaid, M. Fotuhi -Firuzabad, "Well-being Analysis for HVDC Transmission System", IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 2, May 1997.
- [4] R. Billinton, S. Aboreshaid, M. Fotuhi -Firuzabad, "An approach to evaluating system well-being in engineering reliability application", Reliability Engineering and System Safety 50(1995)1-5, 1995.