

HVDC 변환소의 여유요소(Spare)를 고려한 사고확률 분석에 관한 연구

A Study on Outage Probability Analysis of HVDC Converter Considering Spare Elements

오 웅 진* · 최 재 석* · 김 찬 기** · 윤 용 범*
(Ungjin Oh · Jaeseok Choi · Chan-Ki Kim · Yongbeum Yoon)

Abstract - Recently, as a solution to the problem of maintaining system reliability, stability, and quality occurring worldwide, such as activation of smart grid and recognition of super grid and rapid grid interconnection of renewable energy sources HVDC(High Voltage Direct Current) will appear on the front of the electric power system. These concepts are also very important concepts in HVDC systems. When the HVDC system is linked to the existing power system, it is composed of AC/DC/AC conversion device, and these conversion devices are composed of many thyristors. These parts(Devices) are connected in a complicated manner, and they belong to the one with a higher failure rate. However, the problem of establishing the concept of failure rate of HVDC parts directly linked to economic efficiency and the understanding accompanying it are still insufficient. Therefore, in this paper, we establish the meaning of reliability in power system and try to develop a model to analyze and verify the failure rate data of HVDC based on this.

Key Words : HVDC converter station, FOR(Forced Outage Rate), Reliability, System unavailability, K out of N system

1. 서 론

최근, 스마트그리드 기술의 확대 및 슈퍼그리드의 현실화, 신재생 에너지원의 계통연계 증대에 따른 전력계통 신뢰도, 안정도 및 품질유지 문제점의 해결책으로 고압직류전송(High Voltage Direct Current: HVDC)의 역할이 점차 넓어지고 있다. 이러한 관점에서 HVDC 시스템 자체의 신뢰도는 전력계통 전체의 신뢰도와 직결되기 때문에 이에 대한 연구가 시급한 실정이다. HVDC 시스템의 성능을 나타내는 수단으로는 신뢰도(Reliability)와 가용성(Availability) 및 비가용성(Unavailability) 등이 있다. 비가용성은 특정기간 동안의 고장율을 이용하여 계산하며 HVDC 변환소 시스템의 신뢰도는 비가용성(사고율: FOR)의 빈도(Frequency)를 이용하여 계산한다. 특히, 비가용성은 강제 정전 및 예정된 정전(보수유지)으로 분류되며, 유지보수는 강제 정전의 횟수와 시간을 줄이는 효과가 있다.

하지만 HVDC 시스템을 기존의 전력계통에 연계할 경우에는 AC/DC/AC 변환장치들로 구성되며 이러한 변환장치들은 수많은 사이리스터로 구성되어있다. 이들 부품(Devices)들은 복잡하게 연결되어있고 이러한 부품들의 고장률(Failure rate)은 다른 기기보

다 상대적으로 높은 편이며 직/병렬형 연결이 많으므로 다른 시스템보다 사고확률이 높은 편에 속한다[1-12].

또한, HVDC 변환소(Converter)의 고기능화 및 단위설비의 구성다양화에 따라 보다 세밀화된 변환소의 사고확률(=비가용율) 평가모델과 단위설비의 여유요소(Spare) 정도까지 고려할 수 있는 신뢰도 평가가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 설비신뢰도 평가 모형을 기반으로 HVDC 변환설비에서의 여유요소를 고려한 사고확률 산정 방법론을 제안하고, 이를 이용하여 전산자동화 프로그램(HDCSR: HVDC Converter Station Reliability Program)을 새롭게 개발하였다. 사례연구에서는 감도해석을 통하여 그 효용성을 제시하였다.

2. HVDC 변환소의 신뢰도 평가 모델

전력계통은 발전기, 송전선, 배전선 및 보호제어 설비들로 구성된다. 이러한 설비들에서의 고장이 반드시 수용가의 공급지장을 유발하지는 않지만, 안정적인 전력계통 운용을 함에 공급신뢰도 측면에서는 매우 중요한 의미를 가지게 된다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이 전형적인 HVDC 변환소는 직/병렬 및 혼합 시스템으로 구성되어 있다[2]. 여기서 변환소 시스템의 직병렬에 대한 해석이 중요하고 여유요소(Spare)의 개수에 대한 변환소 사고율을 구하는 것이 중요하다. 그림 1에서 1, 2, 3, 4, 5 및 6은 각각 AC Switchyard, AC Filters, Capacitor Banks, Converter Transformers, Thyristor Valves, Smoothing Reactors, DC Filters 및 DC Switchyard를 뜻한다.

† Corresponding Author : Former KEPRI (KEPCO Research Institute), Republic of Korea.

E-mail : yongbeumyoon@gmail.com

* Dept. of Electrical Eng., Gyeongsang National University, Republic of Korea.

** KEPRI(KEPCO Research Institute), Republic of Korea.

Received : September 21, 2018; Accepted : October 24, 2018

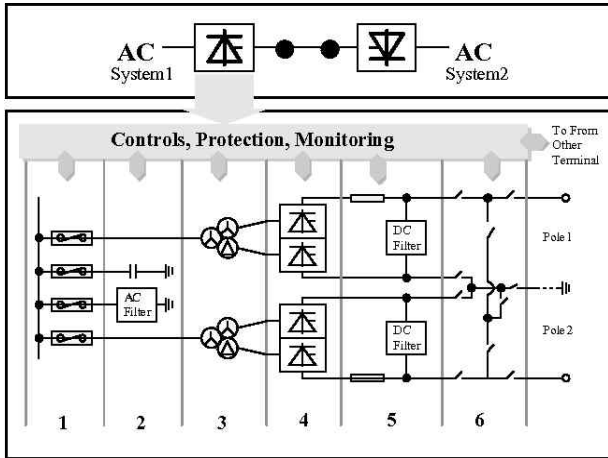


그림 1 전형적인 HVDC 변환소 시스템의 구성도(AC/DC)
 Fig. 1 Structure of Typical HVDC Converter system

참고로 그림 2는 전류형 HVDC 컨버터의 6펄스 다이오드 컨버터 브리지를 나타낸 것이다. 이는 HVDC 컨버터 동작을 이해하기 위한 기본적인 구조이다[14].

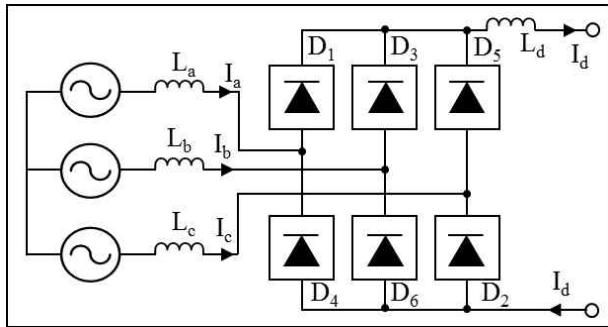


그림 2 다이오드 6펄스 컨버터
 Fig. 2 Diode 6 pulse converter

따라서 본 논문에서는 이러한 시스템에서 여유요소(Spare)의 존재유무에 따라 계통 신뢰도에 미치는 영향에 대해서 감도분석을 분석하는 프로그램을 개발하고 나아가 이를 이용하여 그 유용성을 고찰하였다[1-3]. 여유요소를 S, 시스템이 작동하는 최소 요소의 수를 K라 하면, 시스템의 전체 구성 요소(N)의 수는 식 (1)처럼 정식화 된다.

$$N = K + S \quad (1)$$

2.1 N개 중 K개가 작동하는 시스템(K out of N 시스템)

HVDC 변환소에는 운용신뢰도를 높이기 위하여 사이리스터 및 변압기 등과 같은 구성설비에 고장이 발생한 경우에 대비하여 여유 부품을 확보하게 된다. 본 논문에서는 이러한 부품 여유도를

고려한 계통 사고확률(=비가용율) 등을 산정하는 기 제시된 방법 [2,11]을 재정립하고 이들 상태공간행렬을 정식화하였다. 나아가 이를 이용하여 작동요소가 6개 여유요소 개수가 한 개 및 두 개 일 경우에 대하여 사고확률을 산정하는 전산자동화 프로그램 (HDCSR)을 개발하였다.

N개의 요소로 구성된 시스템에서 K개 이상의 구성요소로 시스템이 기능을 수행할 수 있다고 하면 이를 "K out of N"시스템이라고 한다. 이때, 시스템이 N-K 구성 요소로 작동할 수 있기 때문에 시스템 작동 중단을 초래하는 구성 요소의 최소수는 다음 식 (2)와 같게 나타낼 수 있다[10].

$$x = N - K + 1 \quad (2)$$

일반적으로 정전은 운전중인 발전기가 고장날 때 발생하며, 예비 발전기의 존재 여부에 따라 정전시간은 변하게 된다. 예를 들어 하나의 예비 발전기가 존재할 경우에 첫 번째 시스템의 작동 중단 지속 시간은 예비 발전기가 존재함으로 이를 교체하는 시간을 의미하며, 두 번째 시스템의 작동 중단 지속 시간은 예비 발전기가 존재하지 않으므로 첫 번째 고장 난 발전기가 교체 될 때까지의 대기시간을 더한 교체시간이 된다.

2.1.1 여유요소(Spare)가 한 개인 경우(Single Spare)

n개의 동일한 구성 요소와 하나의 공간을 가진 시스템은 0, 1, 2 및 3으로 지정된 네 가지 상태를 사용하여 나타낼 수 있으며 각 상태는 다음과 같이 정의된다[2].

- 상태 0: 시스템 작동, 교체 가능
- 상태 1: 시스템 작동 중단, 교체 가능
- 상태 2: 시스템 작동, 교체 불가
- 상태 3: 시스템 작동 중단, 교체 불가

상기와 같은 상태천이를 도식적으로 나타내면 그림 3과 같으며 각 변수는 다음과 같이 정의된다.

- n: 시스템의 전체 구성요소의 수
- λ: 각 구성 요소의 고장율
- R: 부품의 교체 시간, 예비 가용
- r: 부품 수리 시간

그림 3에서 나타낸 바와 같이 해당설비의 수리율은 1/R 및 1/r이며, 이때, 상태 3에서는 두 구성 요소가 모두 실패하므로 상태 전환율은 2/r가 된다. 두 구성 요소 중 하나의 수리가 완료되면 시스템은 상태 1이 되며, 수리 된 구성 요소가 설치 될 때까지 시스템은 중단된 상태이다. 이를 행렬로 나타내면 다음 식 (3)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} P_0 & P_1 & P_2 & P_3 \\ n\lambda - 1/R & 0 & 2/r & 0 \\ 0 & 1/R & -(n\lambda + 1/r) & 0 \\ 0 & 0 & n\lambda & -2/r \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

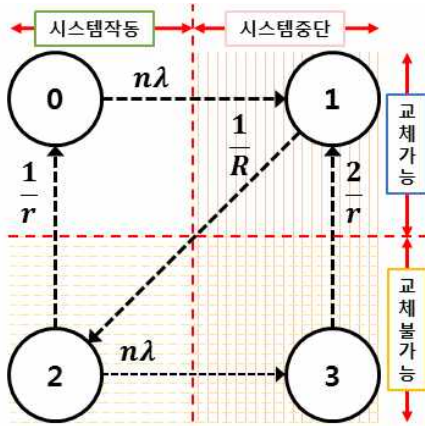


그림 3 여유요소(Spare)가 한 개인 경우의 시스템 상태전이 다이어그램

Fig. 3 Transition diagram for system with a single spare

정상 상태 조건 하에서, 위의 행렬식을 이용해서 상태의 확률을 구하면 식 (4)~(7)과 같다.

$$P_0 = \frac{1}{D} \tag{4}$$

$$P_1 = [n\lambda r(n\lambda + 1/r)R]P_0 \tag{5}$$

$$P_2 = (n\lambda r)P_0 \tag{6}$$

$$P_3 = [(n\lambda r)^2/2]P_0 \tag{7}$$

여기서, $D = 1 + n\lambda r(n\lambda + 1/r)R + n\lambda r + (n\lambda r)^2/2$

따라서 시스템의 신뢰도 지수를 구하면 식 (8)~(11)과 같이 된다.

$$U_s = P_1 + P_3 \tag{8}$$

$$f_s = P_1/R \tag{9}$$

$$r_s = R(1 + P_3/P_1) \tag{10}$$

$$\lambda_s = n\lambda \tag{11}$$

2.1.2 여유요소(Spare)가 두 개인 경우(Two Spares)

그림 4은 동일한 구성 요소와 여유요소(Spare)가 두 개인 경우인 시스템의 상태전이 다이어그램을 보인 것이다. 다이어그램은 두 개의 추가 상태가 추가된다는 점을 제외하면 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템을 나타내는 그림 3과 동일하다[2].

정상 상태 조건 하에서, 상태의 확률은 식 (12)~(18)과 같다.

$$-n\lambda P_0 + P_2/r = 0 \tag{12}$$

$$n\lambda P_0 - P_1/R + P_3/r = 0 \tag{13}$$

$$P_1/R - (n\lambda + 1/r)P_2 + 2P_4/r = 0 \tag{14}$$

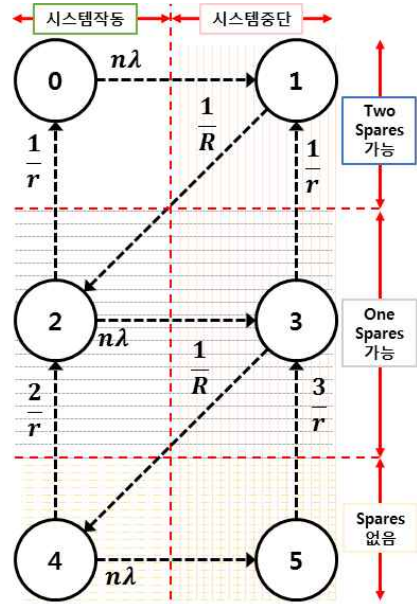


그림 4 여유요소(Spare)가 두 개인 경우의 시스템 상태전이 다이어그램

Fig. 4 Transition diagram for system with two spares

$$n\lambda P_2 - (1/R + 1/r)P_3 + 3P_5/r = 0 \tag{15}$$

$$P_3/R - (n\lambda + 2/r)P_4 = 0 \tag{16}$$

$$n\lambda P_4 - 3P_5/r = 0 \tag{17}$$

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 \tag{18}$$

위의 식 (12)~(17)은 선형 종속적이며, 식 (18)을 통해서 최종해를 구할 수 있다. 해는 식 (19)과 같이 행렬 표기법으로 표현될 수 있다.

$$P = A^{-1}C \tag{19}$$

여기서,

P: 상태 확률의 열벡터

A: 사용된 6개 방정식의 계수 행렬

C: 6개 방정식 상수(오른쪽)의 열벡터

이때, 식 (18)에서의 A와 C 행렬을 나타내면 다음 식 (20)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} n\lambda - 1/R & 0 & 1/r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/R - (n\lambda + 1/r) & 0 & 2/r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n\lambda & 0 & 0 & 3/r \\ 0 & 0 & 0 & 1/R & -(n\lambda + 2/r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n\lambda & -3/r \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

이때, 데이터 매개 변수의 값을 알고 있는 경우 위의 식 (19)

을 사용하여 계통의 신뢰도 지수 값을 계산할 수 있다.

$$U_s = P_1 + P_3 + P_5 \quad (21)$$

$$f_s = (P_1 + P_3)/R \quad (22)$$

$$r_s = R[1 + P_5/(P_1 + P_3)] \quad (23)$$

$$\lambda_s = n\lambda \quad (24)$$

3. 신뢰도 산정 흐름도

HVDC 시스템의 신뢰도를 산정하기 위해서는 우선 그 시스템의 토폴로지(Topology)를 파악한 후, 신뢰도 블록 다이어그램을 그린다. 그 후에 시스템이 직렬인지 병렬인지 아니면 혼합 시스템인지를 파악하고 그 시스템의 여유요소(Spare)의 유무를 분석한다. 그런 뒤에 그 시스템의 신뢰도를 계산한다. 그림 5는 신뢰도 산정 흐름도(Flow chart)를 나타낸 것이다.

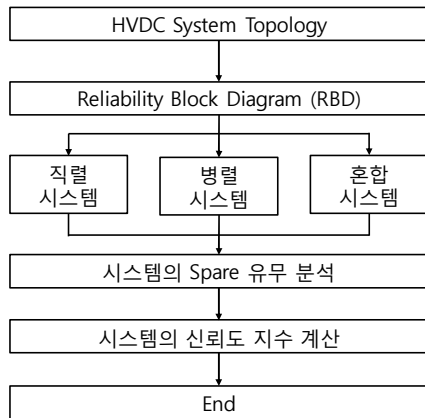


그림 5 HVDC 시스템의 신뢰도 산정 흐름도
Fig. 5 Reliability Calculation Flow Chart of HVDC System

4. 사례연구

본 논문에서는 HVDC 변환소의 여유요소(Spare)를 고려한 사고확률을 산정할 수 있는 방법론을 통해 계통에서 여유요소(Spare)가 한 개 혹은 두 개일 경우의 사례를 비교분석하여 그 유용성을 살펴보고자 한다. 이때, 입력 데이터는 두 시스템 모두 동일하게 가정하였으며, 표 1과 같다[2].

표 1 입력 데이터

Table 1 Input Data

매개변수	입력 값
작동 구성 요소의 수(n)	6
고장율(λ)	0.012 [year]
부품의 교체시간(R)	48 [hours]
부품의 수리시간(r)	6 [months]

4.1 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템

표 1의 데이터와 식 (8)~(11)을 이용하여 계통의 신뢰도 지수를 계산하면 다음과 같다.

표 2 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템의 신뢰도 지수
Table 2 Reliability index for systems with single spare

매개변수	결과값
계통의 사고확률	0.00102[year]
계통의 정전 빈도수	0.072[year]
계통의 복구 시간	0.0142[years]
계통의 고장율	0.072[year]
계통의 부품 교체 대기 시간	76.1003[hours]

4.1.1 고장율 및 교체시간(R)의 변화에 따른 계통의 사고확률 (=비가용율)의 변화

교체시간(R)의 값을 6, 12, 24, 48, 72[hours]로 변화시키면서 그에 따른 계통의 사고확률(=비가용율)의 변화를 살펴보았다.

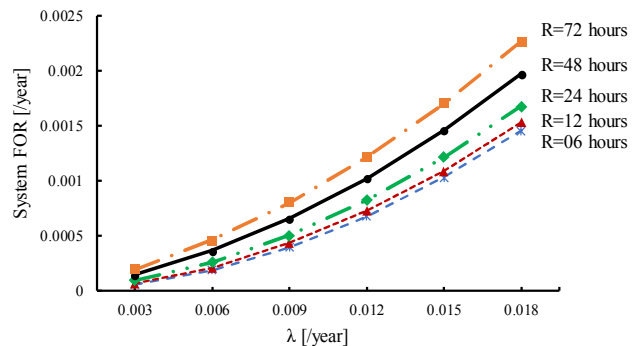


그림 6 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템에서의 고장율 및 교체시간(R)의 변화에 따른 계통의 사고확률 변화

Fig. 6 Change of Outage of system according to change of failure rate(λ) and replacement time(R) in single spare system

여유요소(Spare)가 한 개인 시스템의 경우 그 계통에서 부품의 교체시간이 커질수록 신뢰도가 저하하는 것을 확인할 수 있었다.

하지만, 그림 6에서 나타낸 바와 같이 여유요소(Spare)가 하나가 있기 때문에 그 교체시간을 증가하더라도 계통에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

4.1.2 고장율 및 수리시간(Repair time; r)의 변화에 따른 계통의 사고확률(=비가용율)의 변화

이번에는 부품의 수리시간(r)을 3, 6, 9[months]로 변동시키면서 그에 따른 계통의 사고확률(=비가용율)의 변화를 살펴보았다.

그림 7에서 나타난 바와 같이 수리시간(r)이 교체시간(R) 보다는 계통의 신뢰도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 여유요소(Spare)가 하나 존재하기 때문에 하나의 부품을 수리하는 시간이 길어질수록 계통의 신뢰도는 저하하는 것을 알 수 있다.

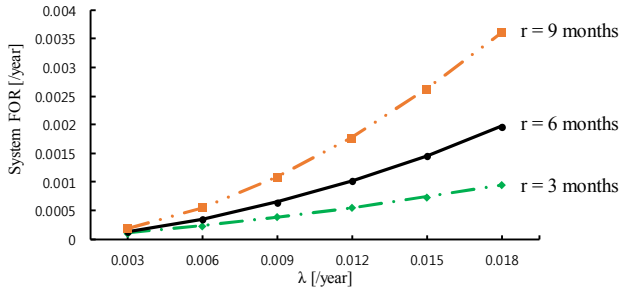


그림 7 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템에서의 고장율 및 수리 시간(r)의 변화에 따른 계통의 사고확률의 변화

Fig. 7 Change of Outage of system according to change of failure rate(λ) and repair time(r) in single spare system

4.2 여유요소(Spare)가 두 개인 시스템

다음으로 여유요소(Spare)가 두 개인 시스템의 신뢰도 지수는 다음 표 3과 같다.

표 3 여유요소(Spare)가 두 개인 시스템의 신뢰도 지수
Table 3 Reliability index for systems with two spares

매개변수	결과값
계통의 사고확률	0.000401 [year]
계통의 정전 빈도수	0.072 [year]
계통의 복구 시간	0.0056 [years]
계통의 고장율	0.0720 [year]
계통의 부품 교체 대기 시간	0.9026 [hours]

4.2.1 고장율 및 교체시간(R)의 변화에 따른 계통의 사고확률 (=비가용율)의 변화

앞의 여유요소(Spare)가 한 개인 경우의 계통과 동일하게 교체시간(R)을 변화시키면서 계통의 사고확률(=비가용율)의 변화를 살펴보았다. 여유요소(Spare)가 존재하고 그 교체시간이 감소할수록 계통의 신뢰도가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 고장율(λ)이 작을 경우에는 부품의 교체시간이 증가하더라도 계통에 크게 영향을 주지 않은 반면 고장율(λ)이 커질수록 시스템의 신뢰도에 미치는 영향이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 이때, 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템과 비교하면, 교체시간의 변화에 따른 신뢰도에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

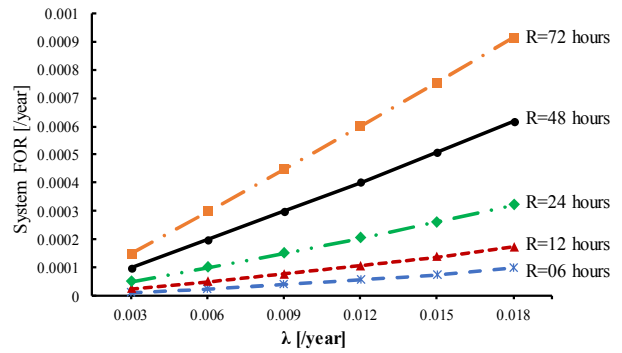


그림 8 여유요소(Spare)가 두 개인 시스템에서의 고장율 및 교체 시간(R)의 변화에 따른 계통의 사고확률 변화

Fig. 8 Change of Outage of system according to change of failure rate(λ) and replacement time(R) in two spares system

4.2.2 고장율 및 수리시간(r)의 변화에 따른 계통의 사고확률 (=비가용율)의 변화

그림 9에서 나타난 바와 같이 수리시간(r)은 여유요소(Spare)가 한 개인 시스템과 비교해서 계통에 미치는 영향이 미비한 것을 알 수 있다. 이것은 부품의 Spare가 2개가 있기 때문으로 사료된다.

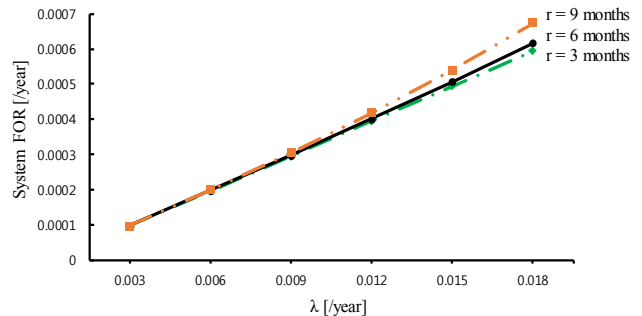


그림 9 여유요소(Spare)가 두 개인 시스템에서의 고장율 및 수리 시간(r)의 변화에 따른 계통의 사고확률의 변화

Fig. 9 Change of Outage of system according to change of failure rate(λ) and repair time(r) in two spares system

4.3 여유요소(Spare)가 한 개와 두 개인 시스템의 비교 분석

전술한 여유요소(Spare)가 한 개의 경우와 두 개인 경우에 고장율(λ)을 변동시키면서 그에 따른 계통의 사고확률(=비가용율)의 변화를 살펴보면 표 4와 같다.

표 4 여유요소(Spare)가 한 개와 두 개인 시스템의 신뢰도 지수

Table 4 Reliability index for systems with single and two spares

매개변수	Single Spare	Two Spares
계통의 사고확률	0.00102[/year]	0.000401[/year]
계통의 정전 빈도수	0.072[/year]	0.072[/year]
계통의 복구 시간	0.0142[years]	0.0056[years]
계통의 고장율	0.072[/year]	0.0720[/year]
계통의 부품 교체 대기 시간	76.1[hours]	0.9026[hours]

또한 그림 10에서 나타난 바와 같이 여유요소(Spare)가 한 개일 경우보다는 두 개일 경우가 계통의 신뢰도 측면에서 고장율(λ) 0.012 [/year]을 기준으로 하였을 때, 약 3배 정도 계통의 신뢰도가 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

나아가 계통의 복구시간(RTS) 또한 짧아지고, 교체대기시간(W)도 2개일 경우가 매우 작아짐을 알 수 있다. 이는 여유요소(Spare)가 많아질수록 신뢰도를 정량적으로 평가할 수 있음을 보이는 것이다.

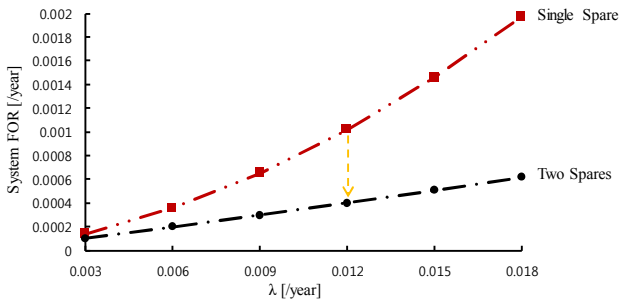


그림 10 여유요소(Spare)가 한 개와 두 개인 시스템의 사고확률 비교 분석

Fig. 10 Comparison of Single and two spares systems

5. 결 론

본 논문에서는 HVDC 구성설비의 여유요소(Spare) 개수를 고려한 계통 사고확률(=비가용율) 등을 산정하는 기 제시된 방법을 재정립하고 상태공간행렬로 정식화하였다. 또한 이를 이용하여 여유요소(Spare)가 한 개 및 두 개인 시스템의 사고확률을 산정하는 알고리즘을 수립하고 계통 신뢰도에 미치는 영향에 대해서 감도해석을 할 수 있는 전산자동화 프로그램(HDCSR; HVDC Converter Station Reliability Program)을 새롭게 개발하였다. 그리고 이를 이용하여 여유요소(Spare)가 한 개 및 두 개인 시스템의 계통 신뢰도를 평가함으로써 그 효용성을 검증하였다. 본 논문의 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫 번째로 HVDC 설비의 증가에 따른 HVDC 변환소의 여유요

소(Spare)를 고려하여 계통의 신뢰도를 평가할 수 있는 방법론을 제안하고 이를 평가함으로써 그 효용성을 검증하였다.

두 번째로 제안한 신뢰도 평가모델을 이용하여 여유요소(Spare)가 하나인 경우와 두 개인 경우의 시스템에서 고장율(λ) 및 교체시간(R)과 수리시간(r)의 변화에 따른 계통의 사고확률(=비가용율) 변화를 파라메트릭(Parametric) 해석을 통해 두 시스템을 비교분석하였다. 계통의 신뢰도 측면에서 그 변화를 고찰한 결과 여유요소(Spare)가 두 개인 시스템이 한 개인 시스템보다 계통의 신뢰도에 미치는 영향이 더 크다는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과를 바탕으로 하여 향후 HVDC 변환소의 여유요소(Spare)가 두 개 이상인 시스템의 사고확률을 산정할 수 있는 방법론을 개발하고 이를 전산자동화 프로그램으로 구축하고자 한다. 또한, 나아가 이를 실제계에 적용하고 여유요소(Spare)의 개수에 따른 경제성 평가까지도 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한전 전력연구원 과제 및 2017년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO.20174030201440)

References

- [1] Kamran Sharifabadi, Lennart Harnfors, Hans-Peter Nee, Staffan Norrga, and Remus Teodorescu, "Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converter for HVDC Transmission Systems", *IEEE Press*, 2016.
- [2] EPRI, "High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Reference Book: 2014 Edition", 2014.
- [3] Jaeseok Choi, "Power System Reliability Evaluation Engineering, G&U Press", 2013.
- [4] D. P. Gaver, F. E. Montmeat, and A.D. Patton, "Power System Reliability I- Measures of Reliability and Methods of Calculation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 83, No. 7, pp. 727-737, July 1964.
- [5] R. Billinton, and V. Prasad, "Quantitative Reliability Analysis of HVDC Transmission Systems Part I. Spare Valve Assesment in Mercury Arc Bridge Configurations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, No. 3, pp. 1034-1046, May 1971.
- [6] R. Billinton, R.N. Allen, L. Salvaderi (ed), "Applied Reliability Assessment in Electric Power Systems", *IEEE Press*, 1991.
- [7] J. D. Hall, R. J. Ringlee, and A. J. Wood, "Frequency and Duration Methods for Power System Reliability Calculations : I-Generation System Model", *IEEE*

Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 9, pp.1787-1796, September 1968.

- [8] Yong Liu, and Chanan Singh, "Reliability Evaluation of Composite Power Systems Using Markov Cut-Set Method", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 25, No. 2, pp. 777-785, May 2010
- [9] Hongbin Li, and Qing Zhao, "A Cut/Tie Set Method for Reliability Evaluation of Control Systems", *2005 American Control Conference*, pp. 1048~1053, June, 2005.
- [10] J. George Shanthikumar, "Recursive Algorithm to Evaluate the Reliability of a Consecutive-k-out- of-n:F System", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-31, No. 5, pp. 442-443, December 1982.
- [11] E.N. Dyalynas, and N.C. Koskolos, "Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 872-878, April 1994.
- [12] Chanki Kim, and Seongdo Lee, "Redundancy Determination of HVDC MMC Modules", *Electronics*, Vol. 4, No. 3, pp. 526-537, August 2015.
- [13] R. Billinton, and Ronald N. A., *Reliability Evaluation of Power Systems*, Springer US, 1996.
- [14] KEPCO, "알기쉬운 HVDC", November 2017.



김 찬 기 (Chan-Ki Kim)

1991년 서울과학기술대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.

E-mail : chankikim@kepcoco.kr



윤 용 범 (Yongbeum Yoon)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). (전) 한전 전력연구원 차세대 송변전연구소장.

E-mail : yongbeumyoon@gmail.com

ORCID ID : 0000-0002-3287-9342

저 자 소 개



오 용 진 (Ungjin Oh)

1985년 7월 6일생. 2013년 경상대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016~동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-772-1715

E-mail : vkdkf@nate.com

ORCID ID : 0000-0001-9105-1791



최 재 석 (Jaeseok Choi)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기 공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~현재 경상대 전기공학과 교수.

Tel : 055-772-1715, Fax : 055-772-1719

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

ORCID ID : 0000-0003-0867-6251