

# 직류송배전설비의 RAM 예측 방향에 대한 소고

김 국헌, 이 성섭, 기 태훈

서울대학교 공학전문대학원 객원교수, 글로벌아이앤씨파트너즈

## A study on the RAM prediction method of DC transmission/distribution systems

Kook Hun Kim, Sung Sub Lee and Tae Hoon Kee

Visiting Professor, GSEP, SNU, Global I&C Partners

### ABSTRACT

직류송배전설비는 동급의 교류송배전설비에 비하여 작게는 수백배, 많게는 수만배 이상의 소자/부품이 사용되기에 우발고장의 가능성(확률)이 상대적으로 높다. 그래서 공급자는 공급자의 발주사양에 맞추는 설계과정에서 가장 먼저 신뢰도 및 가용도 예측을 위한 초기설계 및 검증을 하고, 이에 따라 상세 설계 및 제작 등의 후속과정을 밟아야 한다. 신뢰도 및 가용도에 예측은 부품/소자의 고장률 예측과 대상설비의 fault-tolerance design 특성에 따라 결정되는데, 본고에서는 직류송배전설비의 RAM 예측에 사용될 고장률 예측 code와 신뢰도블럭다이어그램(RBD: Reliability Block Diagram) 모델에 관하여 검토한다

### 1. 서론

직류송배전설비의 폭넓은 상용화를 위해서는 이 설비의 신뢰도 및 가용도에 대한 믿음만한 정량적 평가가 있어야 한다. 사용자의 발주 사양이 정해지면 공급자는 가장 먼저 발주 사양의 RAM을 만족하기 위한 설계에 착수하여야 한다.

RAM 평가의 기본은 구조설계측면에서는 fault-tolerance 및 fail-safe 기능의 구현이며, 이를 기반으로 RBD 또는 FTA 방법에 의한 RAM 평가모델을 구축하고, RAM 예측을 하는 것이다. 이러한 구조설계 및 모델링과 별도로 사용 소자/부품의 고장률에 기반한 단위 모듈의 신뢰도 예측이 있어야 하는데, 소자/부품의 고장률 예측 code 선정이 실제제품의 고장률 예측에 큰 영향을 미친다. 이런 관점에서 어떤 고장률예측 code를 사용해야 하는가는 항상 RAM 전문가들에게는 매우 중요한 관심사였으며, 기본적으로는 MIL 217 F가 가장 많이 사용되어왔다. 그러나 MIL 217 F의 보수성(고장률을 높게 예측)과 최근 기술 동향의 미적용 등으로 그 사용분야가 축소되고 있으며, 반대로 FIDES code 사용이 확대되고 있다.

FIDES code는 열에 의한 가속노화조건 이외에 습도, 환경, 진동, 열싸이클 등의 다양한 요소와 섬세한 Lifecycle을 적용함으로써, 항공산업 및 방위산업 등에서 효과적으로 사용되고 있다. 이런 사유로 Cigre는 MVDC의 RAM 예측에 FIDES code 사용을 적극 권고하고 있다. 본 논문에서는 FIDES code를 직류송배전설비에 적용하기 위한 간략한 도입과 이를 이용한 신뢰도 예측을 위한 RBD 모델의 상세를 다룬다.

### 2. FIDES 고장률 예측 code

FIDES code의 부품/소자 고장률예측에는 part stress 방법, part count 방법, family count 방법이 있다. part stress 방법이 가장 정밀한 방법으로, 이는 해당소자의 설계 및 제조에 적용된 기술과 이 부품/소자를 사용하여 시스템(여기서는 직류송배전설비) 설계 및 제작시에 적용한 기술과 품질 등에 관한 상세한 절차와 기준이 최고수준으로 파악되어야 가능한 방법이다. 이는 주로 항공부품이나 방산설비에 적용되는 경우들이다. family count 방법은 소자/부품에 대한 개략적인 특성을 이용하는 것으로 개념설계 등의 초기 검증에 사용할 수 있는 방법론이다. 상기 두 방법의 중간 정도에 해당하는 것이 part count 방법인데, 이는 일반 산업용 소자/부품 및 산업용 설비 개발 및 제작에 사용되는 설계 및 품질 등이 반영되는 것으로 이해할 수 있다. 여기서는 part count 방법론을 기술한다. 여기서 FIDES 관련 설명은 FIDES Guide<sup>[1]</sup>의 내용을 도입한 것이다.

#### 2.1 part count 방법

part count 방법은 전기전자부품을 35 종류로 분류하고, 이들을 형태 및 용량, 부하특성 등으로 분류하여 123개의 소자/부품으로 구분하며, 이들은 다시 사용중(on power phase)과 대기중(off power phase)의 기본 고장률 및 노화상수가 정해진 형태이다. 사용 소자/부품이 정해지면 이들이 온도, 습도, 진동, 열싸이클, 납땜 형태 등에 의한 노화계수가 사용환경(lifecycle)에 의해 어떻게 고장률이 바뀌게 되는가를 반영한 수식이 완성된다. 여기에 해당 소자/부품이 만들어질 때의 적용기술 및 품질기준이 반영되고, 또 이 소자가 시스템으로 제작될 때 사용되는 기술과 품질이 반영되어, 실제로 만들어진 설비가 특정 환경에서 특정 운전조건으로 사용될 때의 소자/부품의 고장률이 계산된다.

아래와 같은 수식으로 표현된다.

실제 고장률을  $\lambda$ 라고 하면 아래의 식 (1)로 표시된다.

$$\lambda = \lambda_{Physical} \times \Pi_{PM} \times \Pi_{Process} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_{Physical}$  은 아래의 식 (2)로 표시된다.

$$----- \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{Physical}} = \sum_i^{\text{Phases}} \left( \frac{t_{\text{annual}}}{8760} \right) \times (\lambda_{\text{ECU}})_i + \sum_i^{\text{Phases}} \left( \frac{t_{\text{annual}}}{8760} \right) \times \left( \begin{matrix} \lambda_{\text{Th}} \cdot \Pi_{\text{Thermal}} + \\ \lambda_{\text{TcyCase}} \cdot \Pi_{\text{TcyCase}} + \\ \lambda_{\text{TcySolder_Joints}} \cdot \Pi_{\text{TcySolder_Joints}} + \\ \lambda_{\text{M}} \cdot \Pi_{\text{Mechanical}} + \\ \lambda_{\text{RH}} \cdot \Pi_{\text{RH}} \end{matrix} \right) \times (\Pi_{\text{Induced}})_i$$

중괄호 속의 계수 5개는 아래의 표1에서 구해진다.

표 1. 물리적 가속노화 요인 수식

Table 1. Factors contributing to Physical Stressess

$\Pi_{\text{Thermal}}$	$e^{11604 \times Ea_{\text{Th}} \times \left[ \frac{1}{T_0 + 273} - \frac{1}{T_{\text{ambient}} + \Delta T \times e^{-W \cdot T_{\text{ambient}} + 273}} \right]}$
$\Pi_{\text{TcyCase}}$	$\left( \frac{12 \times N_{\text{annual-cy}}}{t_{\text{annual}}} \right) \times \left( \frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)^{m_a} \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} - \frac{1}{T_{\text{max-cycling}} + 273} \right]}$
$\Pi_{\text{TcySolder_Joints}}$	$\left( \frac{12 \times N_{\text{annual-cy}}}{t_{\text{annual}}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{\text{cy}}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)^{m_a} \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} - \frac{1}{T_{\text{max-cycling}} + 273} \right]}$
$\Pi_{\text{Mechanical}}$	$\left( \frac{G_{\text{RMS}}}{0.5} \right)^n$
$\Pi_{\text{RH}}$	$\left( \frac{RH_{\text{ambient}}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604 \times Ea_{\text{RH}} \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{\text{ambient}} + 273} \right]}$

식(2)의 중괄호 속의  $\lambda_{\text{Th}}$ ,  $\Pi_{\text{Thermal}}$  등의 5개의 변수와  $\Pi_{\text{Induced}}$  와 관련된 데이터는 [1]의 part count 방법의 table에서 제공된다. 식(1)의  $\Pi_{\text{PM}}$ ,  $\Pi_{\text{Process}}$ 는 소자/부품 제조사의 상세한 자료 및 MVDC 설계, 제조사의 엄격한 설계, 제조, 시험 및 품질기준에 관한 170여종의 설문과 응답이 필요한데, 산업용 기기에서는 이의 적용이 현실적으로 어렵고, 필요하지 않기도 하다. 이런 경우는 대상설비의 safety-integrity 수준에 따라 필요한 기술수준, 품질기준과 이를 입증할 수 있는 문서체계가 있어야 가능하다. 본 part count 방법에서는 FIDES가 권고하는 default 값을 사용할 수 있다.

## 2.2 part count 방법 적용을 위한 설계자 자료

RAM 예측을 위해서는 사용된 소자/부품의 고장률을 정확히 예측해야 하는데 이를 위해 필요한 사항들은 다음과 같다.

- 1) 사용환경(온도, 습도, 온도싸이클, 진동 등)과
- 2) 사용 주기
- 3) 소자/부품의 특성(예: 밀폐형 여부, 소자의 부하 특성 등)
- 4) 기타 상세(FIDES Guide<sup>[11]</sup>)

## 3. 신뢰도 예측을 위한 RBD 모델링

part count 방법에 의한 부품/소자의 실제 운전상황에서의 고장률 예측 이후에는 이들의 조합으로 이루어진 설비의 신뢰도 예측을 위한 RBD 모델링이 필요하다. 이에 사용되는 RBD의 종류는 아래의 4종으로 요약할 수 있다.

### 3.1.1 단순 직렬모델

이는 가장 기본적인 모델로서, 고장률의 합계가 대상 부분설비의 고장률로 표시되는 모델이다. 이런 모델이 직렬로 연결된 경우에는 전체 신뢰도는 각각의 신뢰도의 곱으로 표시된다.

예를 들어 고장률의 합계가 각각  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 인 PCB 3장으로 구성된 제어기의 신뢰도는 아래 식(3)으로 표시된다.

$$R(t) = \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t\} = \exp\left(-\sum_{i=1}^3 \lambda_i t\right) \quad (3)$$

### 3.1.2 병렬모델 RBD

여기서 병렬모델은 moon(m out of n)으로 표시하며, 정상적으로 동작하기 위해서 최소 m개가 필요한데, n개를 설치한 경우를 가정한다. 이 경우에는 n개의 병렬설비중에서 (n-m)개 이하로 고장이 나면, 설비는 정상적으로 동작할 수 있음을 의미하여,

이 경우의 병렬 설비의 신뢰도  $R_{\text{moon}}(t)$ 는 아래와 같다

$$R_{\text{moon}}(t) = \sum_{i=0}^{n-m} R^{n-i}(t) \{1 - R(t)\}^{n-m} \quad (4)$$

으로 구할 수 있다. 예를 들어

$$R_{1002}(t) = 2R(t) - R^2(t) = 2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t)$$

가 된다. 여기서 병렬모델들은 운전중에 수리, 교체 등의 유지보수가 되지 않는 경우이다. 이는 간단한 조합과 경우의 수의 문제가 된다.

### 3.1.3 병렬모델(운전중 유지보수 가능) RBD

3.1.2와 같은 형태이지만, 운전 중에 유지보수가 가능하다고 하면, 이는 신뢰도가 획기적으로 높아질 수 있다, 예를 들어서 병렬모델의 고장률이 0.0001인데, 고장복구율이 0.1(수리시간 10시간)이라면 병렬모델에서 하나의 모듈이 고장인 상태에서도, 다른 모듈의 추가 고장이 발생할 가능성보다 고장 모듈을 수리해서 모두 정상으로 회복될 확률이 훨씬 높아지므로 전체 설비의 신뢰도는 획기적으로 올라가게 된다. 이의 해석은 Markov Chain을 사용한다. 아래는 유지보수가 가능한 1002 모델의 예이다. 아래 그림 1의  $\lambda$ 는 부분 시스템의 합계고장률,  $\mu$ 는 단위시간당 고장복구율, D는 고장감지 확률, C는 최초 고장을 감지하지 못했지만 지연(예: 순찰 및 점검 등) 감지가 되는 확률을 의미한다. 그림 1을 상세히 설명하면, 최초 고장이 없는(0개) 건전한 상태에서 단위시간에 고장이 발생할 확률은 2개의 설비이므로  $2\lambda$ 가 되며, 이중에 최초 고장이 감지될 확률은 D가 곱해진다. 고장이 감지되지 못한 상태에서는 고장 복구가 불가하며, 늦게라도 고장이 감지되든가 또는 최초에 고장이 감지되면 운전중 유지보수 가능조건에 의해 고장복구율  $\mu$ 의 확률로, 최초상태와 같은 고장이 하나도 없는 상태로 바뀔 수 있음을 의미한다.

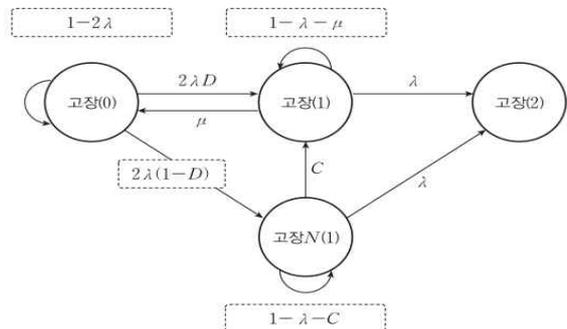


그림 1 1002 병렬모델의 마코프체인 모델  
Fig. 1 1002 parallel module Markov Model

그림 1과 같이 표시되는 상태천이의 방정식은 아래와 같은 미분방정식 형태로 표시할 수 있다.

$$\dot{X}_p(t) = A_p X_p(t)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} (1-2\lambda) & \mu & 0 & 0 \\ 2\lambda D_p & (1-\lambda-\mu) & C_p & 0 \\ 2\lambda(1-D_p) & 0 & (1-\lambda-C_p) & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 4개의 상태는 고장(0), 감지고장(1), 불감지 고장(1), 고장(2)의 4 상태가 되며, 고장(0), 감지고장(1), 불감지 고장(1)의 상태값의 합이 이 모델의 신뢰도가 된다<sup>[21]</sup>.

### 3.1.4 서브모듈 여유분 선정 방법

이는 직류송배전설비에 특히 필요한 기능이다. 수십~수백개의 서브모듈의 직렬동작으로 전력을 공급하는 직류송배전설비에서 하나의 서브모듈의 고장이 전체의 고장을 유발할 수 있으므로, 필요한 개수에 여유분의 개수를 추가로 설치하고, 운전중에 고장인 서브모듈을 bypass switch를 통해 신속하게 대체하는 형식으로 운전한다. 운전기간중에는 서브모듈의 추가나 교체 등이 불가하므로, 정기점검주기(예: 2년 또는 1년 등)까지 몇 개를 추가로 설치하면 차기정기점검까지 최소 필요개수 이상의 서브모듈이 정상동작을 할 것인가의 문제이며, 이에 대한 답은 확률로 주어진다. 이 연산모듈의 기능은

- 1) 특정 개수를 추가할 때, 차기 점검주기까지의 신뢰도를 구하는 방식과
- 2) 차기 점검주기까지의 신뢰도를 특정값 이상으로 하려면 추가 서브모듈의 개수는 최소 몇 개가 되는가?  
상기 두가지 방식의 풀이가 필요하다.

이 기능은 다음과 같은 절차로 풀이가 가능하다.

- 1) 서브모듈의 고장률에 기반한 차기점검주기에서의 신뢰도 계산하여, 이를 p로 놓는다. 한 서브모듈의 고장확률은  $q=1-p$
- 2) 필요 개수를 m, 전체 설치개수를 n이라 하고, 고장날 수 있는 평균 개수와 이의 분산은 각각 np, npq로 주어지고
- 3) 이들은 독립적인 고장을 전체(공통고장원인 없음)하면 정규분포로 해석이 가능하며, 표준화하여
- 4) 표준정규분포확률의 문제로 원하는 미지수(추가 개수 또는 차기점검주기에서의 신뢰도)를 구할 수 있다.

### 3.1.5 통합 신뢰도 연산 방법

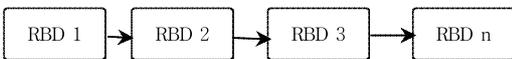


그림 2. 전체 설비의 RBD 모델링  
Fig.2 RBD Modeling of DC transmission system

대상설비를 전체 구성에 따라 몇 개의 직렬형태 신뢰도 블록으로 구분하면, 직류송배전 설비는 각각의 신뢰도 블록을 3.1.1~3.1.4의 형태 중의 하나로 모사할 수 있다.

전체의 신뢰도는 각각의 RBD의 신뢰도의 곱으로 표시할 수 있다.

## 4. 맺음말

아래 그림은 HVDC 업무 프로세스를 보여주는 그림이다. 공급자는 발주자의 사양 접수 즉시 RAM 검토를 하여, 초기설계를 착수하는 것을 기본 프로세스로 하고 있다<sup>[31]</sup>.

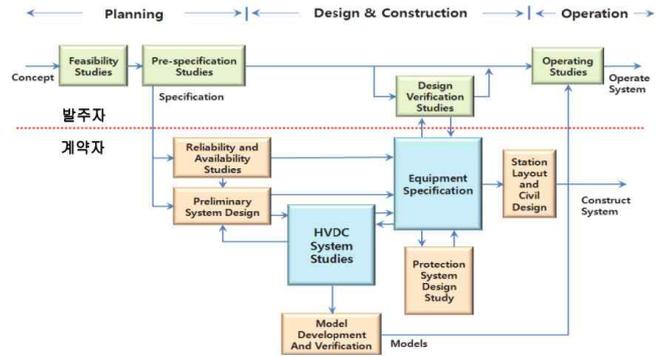


그림 3. HVDC 업무 프로세스  
Fig.3 Reference Process of HVDC Engineering

HVDC, MVDC, LVDC 등의 활용이 증대되는 상황에서 이들 설비의 RAM 분석은 project 착수의 첫단계이다. 또한 RAM 평가는 project 초기에 한번으로 끝나는 것이 아니라, 초기설계 및 설계검증, 시제품제작 및 시험 평가, 그리고 완제품 설치시공 및 이후의 수명주기동안의 관리기록을 바탕으로 계속 update 되어야 할 사항이다.

이를 위한 효과적인 방법으로 FIDES 고장예측 방법과 이를 기반으로한 RAM 평가를 위한 RBD 모델 상세를 기술하였다.

상기 RAM 예측은 수학적/통계적 방법론이며, 문제의 핵심은 실제 설계하고 제작한 설비가 운용환경에서 설계자의 의도대로, 즉 모델링과 유사하게 동작하느냐의 문제이다. 이에 대한 검증은 초기설계단계부터 최종 납품 및 운전단계까지의 고장형태 및 영향분석(FMEA: Failure Mode and Effect Analysis)과 운용환경에 맞는 기기검증(EQ: Equipment Qualification)의 수행이 필수적이며, 이는 RAM 평가의 실제 근사성을 보장하는 최소의 행위이다.

현재는 국방 및 철도분야에 선도적으로 RAM 평가의 사용이 확대되고 있으나, 이의 도입에 기반한 직류송배전 설비 산업의 활성화가 필요하다

## 참고 문헌

- [1] FIDES Guide, 2009 Edition A, Reliability Methodology for Electronic Systems
- [2] 김국현 외 2인, 안전필수시스템 제어설계, 2021, 한빛아카데미
- [3] 알기쉬운 HVDC, 한국전력공사 신송전사업처, HVDC 교육자료