디지털 보호계전기의 신뢰도 분석

송인준*, 안용호*, 양귀장*, 전광식*
한국전력공사*

Reliability Prediction of Digital Protection Relay

In-Jun Song*, Yong-Ho An*, Gwi-Jang Yang*, Kwang-sig Jun*
KEPCO*

Abstract - 한전에서는 계통보호 설비의 신뢰도 확보를 위해 디지털 보호설비 사용을 확대하고 있으며, 이에 따른 합리적인 보호설비 교체기준을 설정하려고 한다. 본 논문에서는 디지털 보호계전기의 교체기준 설정을 위해 디지털 보호 계전기(Digital Distance Relay)와 구성모듈에 대한 고장률(Failure rate)과 평균수명(Mean Time between Failures, MTBF), 그리고 시간에 따른 신뢰도를 분석 하였다. 수명예측방법은 MIL-HDBK-217F, Notice 2의 부품스트레스분석방법(Part Stress Analysis Method) 사용하였다.

1. 서 론

한전에서는 전력계통 보호를 위해 다양한 보호설비를 적용하고 있으며, 계통보호의 신뢰도 확보를 위한 디지털 보호설비 사용이 증가 추세에 있다. 그러나 계통보호 설비의 교체기준은 전자기계형 계전기 기반의 기준으로 운영되고 있어 다양한 보호설비의 특성을 반영하지 못할 뿐만 아니라, 디지털 보호계전기술의 급격한 발달에 따른 구식화 소요기간 및 부품의 수명 단축 현상 등을 반영하지 않아 노후 및 진부화 판정기준 적용에 많은 애로가 있다. 그리고 보호설비 제작사는 일정시간이 지나면 보호설비의 부품을 생산되지 않기 때문에 보호설비가 고장이 났을 경우 부품 조달에 어려움이 있어 현 기준에 맞추어 교체하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 진부화 소요기간, 부품의 수명 단축 및 수리부품의 조기 단종 현상 등을 고려하고, 전자기계형, 디지털형 등 설비 특성을 반영한 교체기준 정립이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 디지털 보호계전기의 교체기준 설정을 위해 한전에서 운용중인 디지털 보호 계전기와 구성모듈에 대한 고장률과 평균수명(MTBF)을 산출하고, 그결과로 시간에 따른 신뢰도를 분석하였다.

MIL-HDBK-217 방법은 전자제품의 MTBF를 산출하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 예측방법이다. 디지털 보호 계전기의 신뢰도 평가는 MIL-HDBK-217F, Notice 2의 부품 스트레스 분석방법(Part Stress Analysis Method)을 사용하여 분석 하였다. 부품 스트레스 분석방법의 경우 부품 고장률에 대한 예측 모델은 부품수 방법처럼 동일한 형태가 아니고 부품마다 다른 형태를 갖는다. 분석 프로그램은 신뢰성 예측 전문 소프트웨어인 RELEX Studio 2007을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 MIL-HDBK-217를 이용한 신뢰성 평가(수명예측) 방법

MIL-HDBK-217는 미 국방성에서 30여년 동안 부품의 현장데이터를 수집하고 분석하여 부품의 고장률(MTBF의 역수)을 산출하고, 부품의 고장률에 영향을 미치는 여러 가지 요인을 분석하여 부품의 고장률을 보정할 수 있는 모델을 제시한 것이다[1]. MIL-HDBK-217에서는 2종류의 신뢰성 예측방법, 즉, 부품수 방법(Part Count Method)과 부품 스트레스 분석방법(Part Stress Analysis)을 제시하고 있다.

부품수 방법은 부품에 대한 많은 정보가 필요하지 않은 방법으로, 부품 종류 및 수량, 환경조건, 품질수준 정도의 정보를 필요로 한다. 이 방법의 예측 모델은 다음 식(1)과 같으며, 모든 부품에 대하여 동일한 형태로 적용하고 있다.

$$\lambda_c = \lambda_g \pi_Q \tag{1}$$

여기서, λ_c는 부품의 예측 고장률, λ_g는 부품의 기본 고장률, λ_Q는 품질요인(quality factor)이다.

부품 스트레스 분석방법은 부품에 대한 상세한 정보를 필요로 하며, 필요정보로는 부품종류 및 수량, 환경조건, 품질수준, 스트레스 수준(온도 및 전압관련), 온도 및 전압의 정격조건등이 있다.

이 방법의 부품 고장률에 대한 모델은 부품수 방법처럼 동일한 형태가 아니고 부품마다 다른 형태를 갖는다. 대표적인 형태는 다음과 같다.

$$\lambda_c = \lambda_g \pi_E \pi_T \cdots \pi_Q \tag{2}$$

여기서, λ_c는 부품의 예측 고장률, λ_g는 부품의 기본 고장률, λ_E는 환경요인(environmental factor), λ_T는 온도요인(temperature factor), λ_Q는 품질요인(quality factor) 이다

제품의 예측 고장률은 (1)식과 (2)식의 모델을 이용하여 구한 부품의 예측 고장률을 합함으로써 구한다.

2.2 디지털 보호 계전기의 신뢰도 분석

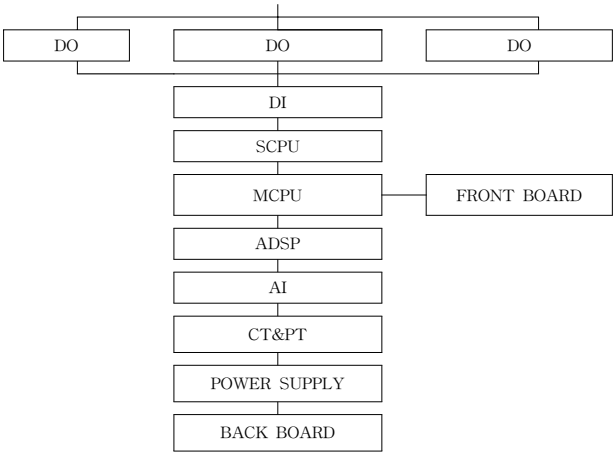
2.1.1 시스템 구성 및 신뢰도 블록 다이어그램

본 분석에서 대상으로 한 디지털 보호 계전기는 <표 1>의 구성 모듈로 구성되어 있다.

<표 1> 시스템 구성

번호	모델명	수량
1	DO	3
2	DI	1
3	SCPU	1
4	MCPU	1
5	ADSP	1
6	AI	1
7	CT&PT	1
8	POWER SUPPLY	1
9	FRONT BOARD	1
10	BACK BOARD	1

디지털 보호계전기의 구성 제어모듈들의 기능을 분석하여 신뢰도 불록 다이어그램을 그리면 다음 <그림 1>과 같다. DO 모듈은 3개의 모듈로 이중화 구조를 가지고 있다.



<그림 1> 디지털 보호계전기의 신뢰도 블록 다이어그램

2.1.2 수명예측 절차

디지털 보호 계전기의 수명예측은 MIL-HDBK-217F, Notice 2의 부품 스트레스 분석방법(Part Stress Analysis Method)을 사용하였으며, 다음과 같이 가정하였다.

① 부품의 수명은 지수분포를 따른다.
② 모든 부품은 직렬로 연결되어 있다.
③ 각 부품은 통계적으로 독립이다.
④ 사용 환경은 온습도 관리가 되는 제어실에 사용되므로 GB(Ground Benign)를 적용한다.
⑤ 시스템의 주위 온도는 30℃로 한다.
⑥ 부품의 품질수준은 상용수준(Commercial)과 상용수준 한 수준 위의 MIL-SPEC 수준을 적용하여 품질수준에 따라서 어떻게 값이 달라지는지 제시한다.

부품 스트레스 분석방법의 경우 부품 고장률에 대한 모델은 부품수 방법처럼 동일한 형태가 아니고 부품마다 다른 형태를 갖는다. 대표적인 형태가 식(4)와 같은 형태이다.

수명예측은 다음과 같은 절차로 수행한다.

- 단계 1: 대상 제어시스템의 구성모듈 목록을 작성한다.
- 단계 2: 각 구성모듈의 부품리스트를 작성한다.
- 단계 3: 각 모듈의 구성부품을 MIL-HDBK-217의 분류기준에 따라서 분류한다.
- 단계 4: 각 구성모듈에 대하여 MIL-HDBK-217의 고장률 데이터를 이용하여 구성부품의 고장률을 산출한다.
- 단계 5: 각 구성모듈에 대하여 MIL-HDBK-217의 고장률 데이터를 이용하여 산출한 구성부품의 고장률을 합산한다.
- 단계 6: 단계 5에서 고장률을 합산한 값의 역수를 취하여 구성모듈의 평균수명(MTBF)을 산출한다.

본 분석에서는 신뢰성 예측 전문 소프트웨어인 RELEX Studio 2007을 사용하였다. RELEX 소프트웨어는 신뢰성 분석 툴을 제공하는 소프트웨어 로서 부품명을 입력하면 부품에 대한 데이터베이스(Library)를 포함하고 있어 자동으로 부품에 대한 정보를 제공하고, 제품 의 MTBF와 고장률을 계산해 준다.

2.2.3 수명예측 결과

디지털 보호 계전기를 구성하는 모듈들의 품질수준에 따라 MTBF를 예측한 결과 <표 2>와 같은 값이 산출되었다.

<표 2> 디지털 보호 계전기 구성모듈의 MTBF와 고장률

번호	모듈명	품질수준 (Commercial)		품질수준 (Mil-spec)	
		MTBF (hours)	고장률 (10^{-6}/h)	MTBF (hours)	고장률 (10^{-6}/h)
1	DO	216,076	4.63	92,633	10.80
2	DI	356,109	2.81	131,968	7.58
3	SCPU	458,456	2.18	161,938	6.18
4	MCPU	582,688	1.72	177,767	5.63
5	ADSP	1,801,652	0.56	442,669	2.26
6	AI	809,930	1.23	239,136	4.18
7	CT&PT	3,210,366	0.31	1,028,450	0.97
8	POWER SUPPLY	368,467	2.71	139,856	7.15
9	FRONT BOARD	364,000	2.75	163,216	6.13
10	BACK BOARD	5,755,760	0.17	1,808,740	0.55

<표 2>의 고장률 데이터를 사용하여 디지털 보호 계전기의 신뢰도를 계산한다. 디지털 보호 계전기의 신뢰도 $R_{SYS}(t)$는 <그림 1>과 같이 DO(이중화), DI, SCPU, MCPU, ADSP, AI, CT&PT, POWER SUPPLY, FRONT BOARD, BACK BOARD 모듈로 구성되어 t시간까지 고장나지 않을 확률로서 식(3)과 같이 계산된다.

$$R_{SYS}(t)=[1-(1-(R_{DO}(t))^3]\times R_{DI}(t)\times R_{SCPU}(t)\times R_{MCPU}(t)\times R_{ADSP}(t) \times R_{AI}(t)\times R_{CT\&PT}(t)\times R_{PS}(t)\times R_{FB}(t)\times R_{BB}(t) \quad (3)$$

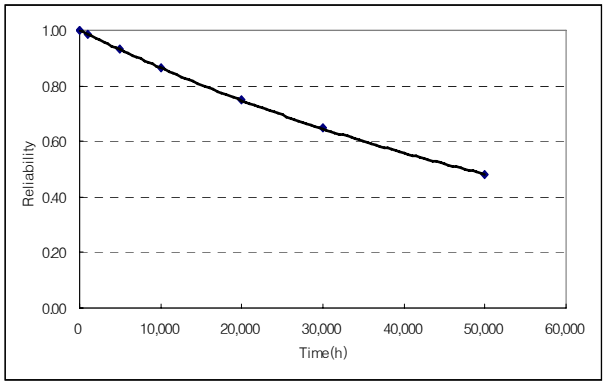
식(3)에서 $R_{DO}(t)$, $R_{DI}(t)$, $R_{SCPU}(t)$, $R_{MCPU}(t)$, $R_{ADSP}(t)$, $R_{CT\&PT}(t)$, $R_{AI}(t)$, $R_{PS}(t)$, $R_{FB}(t)$, $R_{BB}(t)$는 DO(이중화), DI, SCPU, MCPU, ADSP, CT&PT, POWER SUPPLY, FRONT BOARD, BACK BOARD, AI,가 t시간까지 고장나지 않을 확률로서 식(4)~식(13)과 같이 계산된다.

$$R_{DO}(t)=\exp(-\lambda_{DO}\times t) \quad (4)$$
$$R_{DI}(t)=\exp(-\lambda_{DI}\times t) \quad (5)$$
$$R_{SCPU}(t)=\exp(-\lambda_{SCPU}\times t) \quad (6)$$
$$R_{MCPU}(t)=\exp(-\lambda_{MCPU}\times t) \quad (7)$$
$$R_{ADSP}(t)=\exp(-\lambda_{ADSP}\times t) \quad (8)$$
$$R_{AI}(t)=\exp(-\lambda_{AI}\times t) \quad (9)$$
$$R_{CT\&PT}(t)=\exp(-\lambda_{CT\&PT}\times t) \quad (10)$$
$$R_{PS}(t)=\exp(-\lambda_{PS}\times t) \quad (11)$$
$$R_{FB}(t)=\exp(-\lambda_{FB}\times t) \quad (12)$$
$$R_{BB}(t)=\exp(-\lambda_{BB}\times t) \quad (13)$$

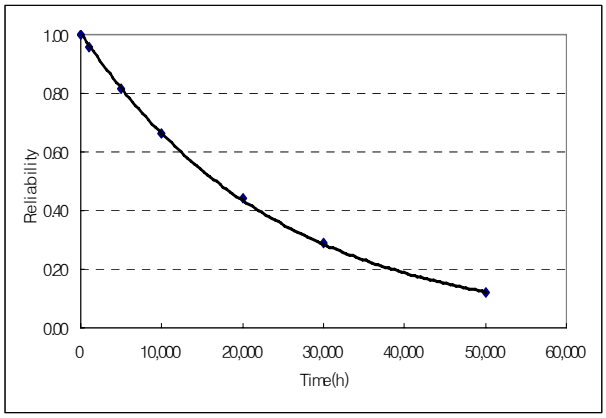
이로부터 부품의 각 품질수준(commercial, mil-spec)에서의 디지털 보호 계전기의 시간에 따른 신뢰도를 계산하면 <표 3>과 같고, 이를 그래프로 표현하면 <그림 2> ~ <그림 3>과 같다.

<표 3> 디지털 보호 계전기의 시간에 따른 신뢰도

시간(h)	신뢰도(%)	
	품질수준(commercial)	품질수준(mil-spec)
0	1.00	1.00
1,000	0.96	0.99
5,000	0.82	0.93
10,000	0.67	0.87
20,000	0.44	0.75
30,000	0.29	0.65
50,000	0.12	0.48



<그림 2> 시간에 따른 신뢰도(품질수준 : MIL-SPEC)



<그림 3> 시간에 따른 신뢰도(품질수준 : Commercial)

3. 결 론

본 논문에서는 한전에서 운용중인 디지털 보호 계전기에 대하여 각 모듈 별로 고장률과 MTBF를 추정하였고, 추정된 고장률과 MTBF를 기초로 시스템의 시간에 따른 신뢰도를 계산하였다. 구성모듈의 MTBF 추정 결과 DO 모듈이 92,633시간(commercial), 216,076 시간(mil-spec)으로 가장 짧은 것으로 확인 되었다. 1,000시간 사용할 때 부품의 품질수준에 따라 신뢰도가 약 96%(commercial)와 99%(mil-spec)정도 되는 것으로 분석되었다.

[참 고 문 헌]

[1] MIL-HDBK-217F(1995), Reliability Prediction of Electronic Equipment
[2] Tobias, P. A. and Trindade, D. C., Applied Reliability, 1986
[3] Nelson, W, Accelerated Testing, John Wiley & Sons, 1990.