

기후인자를 고려한 배전계통 설비의 시변 고장률 추정

(Measurement of Time-Varying Failure Rate for Power Distribution System Equipment
Considering Weather Factor)

김재철*

(Jae-Chul Kim)

요 약

본 논문에서는 배전 시스템을 구성하는 기기들에 대한 설치 현황자료와 고장 자료 및 전국 지점을 대상으로 한 설문조사 자료를 이용하여 기후별 고장률을 예측하였다. 같은 종류의 배전 설비라 하더라도 그 설비가 설치되어 있는 기후 상태에 따라서 고장률은 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 배전기기의 고장률을 설비관리나 최적 투자 계획의 운용에 사용하기 위해서는 대상 설비가 설치된 기후 특성을 고려해야 하며 이를 위해 기후 특성을 고려한 고장률 예측이 요구된다고 할 수 있다. 기후특성분석을 위하여 한국전력공사의 전국지점을 대상으로 기후 특성(호우, 낙뢰, 강풍, 해일, 특징 없음)으로 구분하여 설문조사를 실시하였고 기후 특성에 따른 영향도를 분석하였고 고장률 추정 알고리즘을 제안하였다.

Abstract

In this paper, the time-varying failure rate to consider climate effect was extracted. Even if the same kind of equipments is estimated for extracting the time-varying failure rate, the failure rates could be different depending on external effect such as climate. With the consequence, the failure rate extracted to consider the climate effect is necessary for using the failure rate on the optimal investment plan or asset management. To consider the characteristic of climate effects(classified into 5 categories, heavy rain, thunderbolt, strong wind, tidal waves, no character), the survey of officers charging the operation of equipment in KEPCO branch office was done. With this consequence, this paper suggest the failure rate extraction method to consider the climate effect analyzed by the survey.

Key Words : Time-Varying Failure Rate, Climate Effect, Heavy Rain, Thunderbolt, Strong Wind, Tidal Waves

1. 서 론

배전계통의 신뢰성 평가는 배전 시스템 운전계획 수립이나 시설 투자 배분, 그리고 적정 신뢰성 유지를 하기 위한 유지보수를 위해 반드시 필요한 부분이다. 또한 배전계통 신뢰성 평가를 위해서는 시스

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009년 1월 28일
1차심사 : 2009년 1월 29일, 2차심사 : 2009년 6월 9일
심사완료 : 2009년 6월 12일

템을 구성하는 기기들의 고장률이 가장 기본적으로 요구되는 정보이다. 고장률은 배전시스템의 신뢰도 지수 산출을 위한 필수 요소이며, 배전 설비에 대한 사전 및 사후 보수 정책 결정 및 신규 투자에 대한 의사 결정시 필요하다.

그러나 배전계를 구성하는 기기들의 고장자료는 관리되고 있지만 이를 활용한 기기별 고장률에 대한 분석이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 배전 시스템을 구성하는 기기들에 대한 설치 현황자료와 고장 자료 및 전국 지점을 대상으로 한 설문조사 자료와 기본 신뢰도 이론을 토대로 배전 기자재에 대한 연도별에 따라 기후영향을 고려한 고장률을 산출하였다[1-3].

2. 배전설비의 고장 자료 기초 분석

기존의 연구[4]는 기후의 영향을 고려하지 않고 분석된 결과이며, 본 논문에서는 기존의 연구의 고장자료의 모집단을 동일하게 하기 위해 1993년 이후 수집된 고장자료를 대상으로 하였다. 또한 최근에 도입된 설비의 경우 고장 자료의 수가 상대적으로 적게 수집이 된 설비도 다수 있었고, 이러한 설비의 경우 자료의 수가 미비하여 의미 있는 결과를 도출하기 어려운 점이 존재하지만 추후에 고장 자료의 수집이 보강이 될 경우 보다 정확한 결과를 도출할 수 있을 것이다.

2.1 고장률 분석 대상 설비

고장률 분석을 수행한 배전설비 및 수집된 자료의 수는 표 1과 같다. 본 논문에서는 배전 설비의 고장률을 각 설비에 대해 원인별, 지역별로 나누어 도출해야 하지만 자료의 수가 부족하여 정확한 결과를 구하기 어려운 경우도 있고 변압기의 경우 고장이 발생한 시기만 기록되어 있을 뿐 설치된 시기는 기록이 되어 있지 않아 수명 계산이 불가능하기 때문에 고장률 계산이 불가능한 경우도 있었다. 이런 경우는 앞서서도 언급했듯이 추가적인 자료 수집을 통해 보다 정확한 고장률 계산을 수행할 수 있다[4].

표 1. 기기별 고장 자료 현황
Table 1. The present condition of equipment failure data

기기명	수집현황	총 자료수	가용 자료수	비가용 자료수
OC전선	1993~2004	5,418	3,489	1,929
CNCV케이블	1993~2004	1,508	850	658
CNCV-W케이블	1998~2004	137	87	50
G/S개폐기	1993~2004	637	415	222
I/S개폐기	1993~2004	373	171	202
지상변압기	1993~2004	349	0	349
주상변압기	1993~2004	14,696	0	14,696
변압기C.O.S	1993~2004	1,910	819	1,091

2.2 배전 설비의 고장원인 분석

그림 1은 표 1에 수집된 고장자료를 토대로 전체 배전설비에 고장원인별 비율을 나타내고 있다. 이를 보면 보수불량 27[%], 외물접촉 24[%], 자연현상 23[%], 설비불량 13[%], 고의 및 과실 9[%] 등으로 분석되었다.

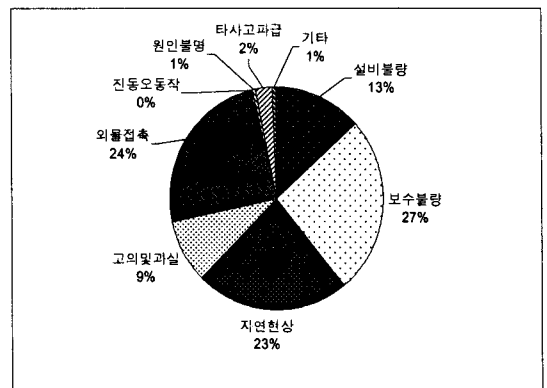


그림 1. 고장원인별 비율
Fig. 1. The ratio by failure cause

동일한 종류의 배전 설비라 하더라도 그 설비의 기후 상태에 따라서 고장률은 다르게 나타날 수 있다.

그러므로 배전 설비의 고장률을 설비관리를 위해서는 대상 설비가 설치된 지역특성을 고려해야 하며 이를 위해 설치 지역의 기후특성을 고려한 고장률

기우인자를 고려한 배전계통 설비의 시변 고장을 주경

산출이 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 한국전력공사 지점의 주소를 바탕으로 전국 지점이 위치한 지역의 기후특성을 고려하여 배전 설비 관리를 담당하는 담당자를 대상으로 설문조사를 실시하였으며, 전력연구원에서 수행된 연구과제의 일부이다[10].

설문 조사 방법은 다음과 같다. 설문 조사 대상은 현장 관리자들의 의견을 반영하기 위해 한국전력공사 지점에 근무하는 배전 설비 현장 관리 담당자로 하였다. 각 지점별로 담당자가 여러 명이고 각 담당자가 담당하는 지역이 서로 상이하기 때문에 각 지점별로 4부의 설문지를 우송하였다. 대표적인 설문지의 내용은 각 현장 관리자가 담당하는 지역의 기후 특징을 각 배전 설비별 평균 수명 및 기후 특성이 배전 설비의 수명에 미치는 영향 정도를 알아볼 수 있도록 구성되었다[10].

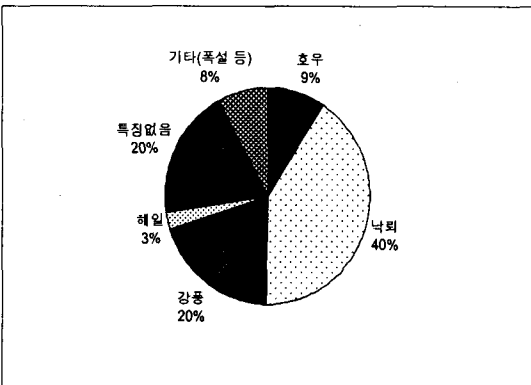


그림 2. 배전기기 설치 지역의 기후별 비율
Fig. 2. The ratio by climate of equipment install area for power distribution system

본 논문에서는 기후특성을 호우, 낙뢰, 강풍, 해일, 특징 없음으로 구분하였다. 설문은 한국전력공사지점을 대상으로 실시되었지만 회신은 133개 지점에서 회수가 되었고, 지점 당 평균 3.5개의 설문지 회수되어 총 471부의 설문지가 회수되었다. 설문지 응답 내용은 현장 관리자의 주관에 많이 반영되어 있지만 다른 측면에서 보면 실제의 현장 실정을 가장 잘 알고 있는 관리자들의 의견이라는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다. 설문지에 나타난 우리나라의 기후 특성 비율은 그림 2와 같이 나타나 있다. 그림

2를 보면 기후별 특성은 낙뢰가 40[%]로 가장 많고, 강풍 20[%], 호우 9[%], 해일 3[%], 폭설이나 태풍 등의 기타 기후가 8[%]이며 별다른 기후적 특성이 나타나지 않는 지역도 20[%]에 이르는 것으로 분석되었다.

3. 설문지 분석 결과

수집된 설문지를 바탕으로 각 배전기기의 기후별 평균 예상 수명을 분석하였다. 분석 방법은 설문지를 기후별로 구분한 다음 설문 항목에 있는 예상 수명을 이용하여 평균 예상 수명을 구하였다. 그 결과 각 배전 기기의 예상 수명은 표 2와 같이 분석되었으며 이러한 예상수명은 설비의 유지, 보수 및 관리 정책 수립에 많은 효과가 있을 것이다.

표 2. 설문지에 의한 배전기기의 예상수명
Table 2. The expected lifetime of power distribution equipment by survey

기기명	평균예상 수명 [년]	기기명	평균예상 수명 [년]
OC 전선	16.4	I/S 개폐기	12.5
CNCV케이블	18.7	지상변압기	14.9
CNCV-W케이블	20.3	주상변압기	13.0
G/S 개폐기	15.1	변압기 C.O.S	12.2

다음으로 기후별 특성이 각 배전 설비의 수명에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 설문을 바탕으로 배전 기기가 설치된 지역의 환경적 특성이 고장률에 미치는 영향을 산출하였다.

3.1 기후별 평균 예상 수명

설문조사에 근거한 배전 기기의 기후별 영향도는 그림 3에 정리되어 있다. 결과를 분석하면 뚜렷한 기후 특성이 없는 경우에 비해 호우, 낙뢰, 강풍, 해일 등은 배전 설비의 수명을 크게 감소시킴을 알 수 있다. 낙뢰의 경우는 상대적으로 영향이 적지만 해일은 그 영향이 매우 커서 평균수명을 크게 감소시키는 것을 알 수 있다.

배전 기기의 기후별 영향도는 그림 4에 나타내었다. 결과를 보면 기후별 영향도의 크기는 해일 지역의 경우 이상적인 경우에 비해 크게 영향을 받는 것으로 나타났고, 뚜렷한 기후적 특징이 없는 지역이 영향을 가장 덜 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 배전설비의 유지보수 및 설비투자 계획 시 반영된다면 보다 경제성을 가지는 결과를 도출할 것으로 사료된다.

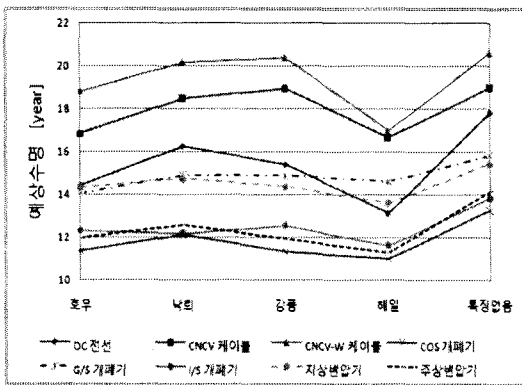


그림 3. 배전 설비의 기후별 평균 예상 수명
Fig. 3. Average estimated life by climate of power distribution system assets

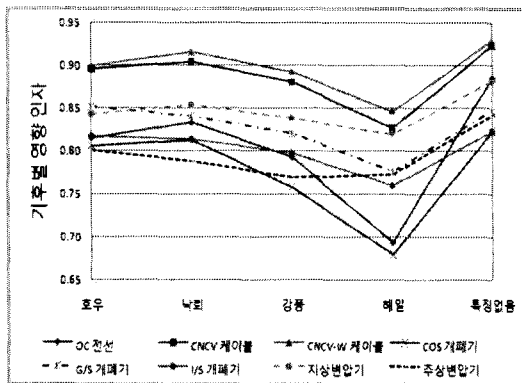


그림 4. 배전 설비의 기후인자에 의한 영향
Fig. 4. Effect by climate factor of power distribution system assets

4. 배전 설비의 고장률 분석 방법

배전 설비에 대한 고장률 추정은 그림 5와 같은 절차를 따라 추정된다[5-6].

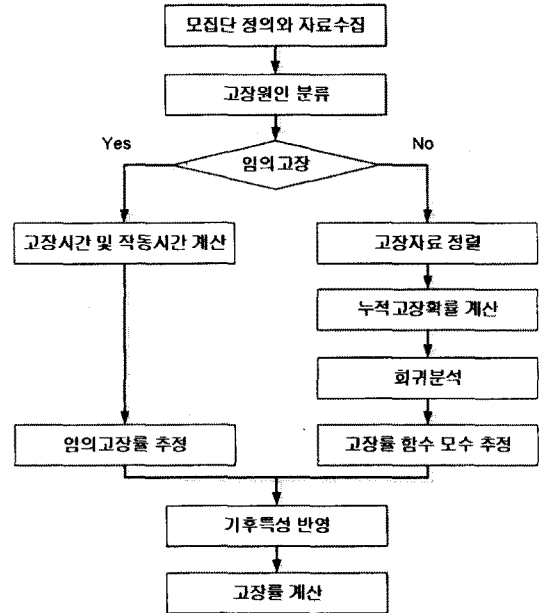


그림 5. 고장률 추정 절차
Fig. 5. The process of failure rate estimation

4.1 모집단 정의를 통한 자료수집

배전 설비의 고장률 추정을 위한 가장 첫 번째 단계는 분석 자료에 대한 모집단의 범위를 정하는 것이다. 모집단의 통계학적 의미는 자료를 수집하는 대상이 되는 전체집합을 의미한다. 배전 설비의 고장률 추정 및 신뢰도 분석을 하기 위해서는 특정 기간 동안 설치된 배전 설비 중에 고장 배전기기에 대한 자료뿐만 아니라 고장이 발생하지 않은 기기에 대한 수명 자료도 요구된다.

본 논문에서는 자료에 대한 모집단을 다음과 같은 방법으로 정의하였다. 배전 설비의 실제 고장 자료로는 과거 12년간(1993년~2004년)의 고장 자료를 사용하였고, 각각의 배전 설비의 고장 자료 중에서 설치시기가 가장 빠른 시기를 기준으로 모집단의 기간 및 범위를 정의하였다.

4.2 고장원인 분석

배전 설비의 고장률 추정을 위한 두 번째 단계는 고장 자료에 대한 고장 원인 분석이다. 현재 사용되

기후인자를 고려한 배전계통 설비의 시변 고장을 추정

고 있는 한국전력의 배전 설비 고장관리 사용 코드는 표 3과 같다[7].

표 3. 배전 설비의 고장 관리 코드
Table 3. Failure management codes of power distribution equipment

원인별		적용구분
대분류	소분류	
설비 불량	제작불량	기자재의 제작, 재질등의 결함
	시공불량	신규, 개보수공사등의 시공상 결함
보수 불량	보수불량	순시, 정기정검등의 소홀에 의한 것
	자연열화	제작, 시공상의 결함없이 자재의 경년열화
	과부하	정격용량을 초과하여 발생한 것
자연 현상	부식	화학적, 전기적 부식에 의한 것
	풍우해	풍우, 폭풍, 홍수, 해일 등에 의한 것
	뇌해	작격뢰, 유도뢰에 의한 것
	빙설해	우박, 폭설, 결빙, 폭풍설 등에 의한 것
고의 및 과실	염진해	염분, 먼지, 안개, 매연 가스등에 의한 것
	작업자과실	전기설비를 직접 시공하는 작업자 또는 도급자의과실에 의한 것
	일반인과실	차량충돌, 굴착, 건축·토목공사장의 비접촉안테나 설치시 접촉, 전선로 인근 수목벌채 접촉 등 일반인의 고의 또는 과실에 의한 것
의물 접촉	화재	전기설비주변의 가옥, 산등의 화재에 의한 것
	수목	(규격 이격거리 이내의 수목접촉은 보수불량)
	조류	새, 새집, 동물등의 접촉
진동 오동작	기타	비닐, 연, 건물에서 자연적인 낙하물등의 접촉
	진동	중기, 과적차량의 운행, 도로공사 등으로 지반의 진동에 의한 것
	오동작	차단기, 보호계전기등의 오동작에 의한 것
타 사고 파급		당사설비로 인해 사고가 발생한 것
원 인 불 명		사고개소와 사고원인을 알 수 없는 것
기 타		

본 논문에서는 고장의 유형을 임의고장(random failure)과 열화고장(aging failure)의 2가지의 범주로 나누어 분석하였다. 수집된 고장 자료에는 고장 원인이 다양하게 기록되어 있지만 배전 설비의 고장은 크게 가동 기간과 관계없이 우연적인 원인에 의한 임의고장과 오랜 가동으로 인해 수명이 다하여 고장이 발생한 열화고장으로 나눌 수 있다. 따라서

본 논문에서는 자연현상이나 외물접촉, 고의 및 과실 등의 원인들을 임의고장의 원인에 포함하였고 자연열화와 부식을 열화고장의 원인으로 분류하였다.

4.3 기후별 영향도 반영

배전 설비의 고장률은 기후 특성에 따라 달라진다는 것은 자명한 사실이다. 기후 특성의 경우 우발성이 강하기 때문에 임의 고장률에 영향을 미친다고 볼 수 있다.

기후 특성을 나타내는 영향정도를 기후인자(ρ_c)라고 정의하면 기후인자는 배전 설비의 고장률을 증가시키는 영향을 가지므로 임의 고장률에 직접 반영되도록 구성하였고, 표 4에 기후인자 값을 나타내었다.

표 4. 배전 설비의 기후별 영향도
Table 4. The effect rate by climate of power distribution system assets

	호우 기후	낙뢰 기후	강풍 기후	해일 기후	특징 없음
OC 전선	1.028	1.006	1.057	1.208	0.946
CNCV 케이블	1.009	1.000	1.027	1.094	0.978
CNCV-W 케이블	1.016	0.998	1.023	1.080	0.983
COS 개폐기	1.131	1.121	1.202	1.341	1.116
G/S 개폐기	0.986	1.000	1.024	1.083	0.992
I/S 개폐기	0.995	1.000	1.020	1.070	0.988
지상변압기	1.020	1.006	1.025	1.048	0.974
주상변압기	1.005	1.022	1.047	1.042	0.957

기후인자를 구하는 방법은 그림 4에서 구한 영향도를 이용하면, 고장률의 증가를 가져오는 기후인자는 [전체영향도/기후영향도]의 형태로 값을 구할 수 있다.

한 예로 가공선로의 경우 총 471개의 설문지에 대한 가공선로의 기후영향에 대한 점수는 0.838점이었으며, 이중 호우기후의 영향에 대한 응답은 평균 0.815점으로 평가되었고, 호우기후에 대한 가공선로의 ρ_c 는 1.028의 가중치가 계산된다.

4.4 배전 설비의 고장률 분석

배전 설비의 설비 관리를 위해서는 배전 설비의 신도율의 추정이 필수적이다. 배전 설비의 고장률은 신뢰성이론 측면에서 보면 연도별 기대 고장 회수를 의미한다. 배전 설비의 연도별 기대 고장 회수는 고장률 함수를 원하는 기간에 대하여 적분을 통해 추정할 수 있다. 본 논문에서 추정한 배전 설비의 고장률 함수는 임의고장률과 열화고장률로 나누어지고 배전 설비의 최종적인 고장률 함수는 임의고장률과 열화고장률의 합으로 표현된다. 여기에 기후인자를 반영하여 최종적인 고장률 함수를 유도하게 된다. 배전 설비의 임의고장률을 λ_0 라 하면 와이블 분포의 고장률 함수는 식 (1)과 같으므로 기후인자가 반영된 배전 설비의 전체 고장률은 식 (2)와 같이 표현된다[8-9].

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} + \lambda_0 \times \rho_c \quad (2)$$

여기서 m 은 형상모수, η 는 척도모수를 의미한다. 최종적인 고장률 함수를 임의의 기간 $[t_1, t_2]$ 에 대해 적분하면 그 기간 동안의 기대 고장 회수를 계산할 수 있으며 식 (3)과 같다.

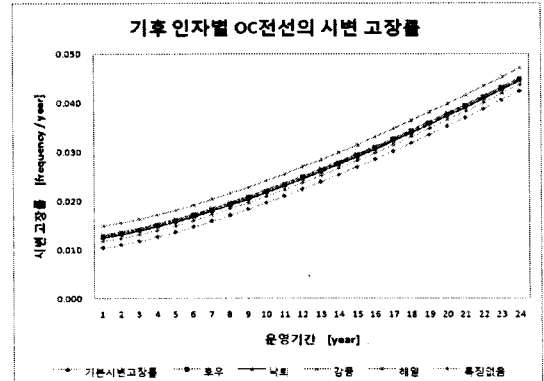
$$E[N(t_2)] - E[N(t_1)] = \left[\left(\frac{t_2}{\eta} \right)^m - \left(\frac{t_1}{\eta} \right)^m \right] + \lambda_0 \rho_{\gamma} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

여기서 $E[N(t)]$ 는 t 시간 동안의 고장 발생 회수를 의미한다.

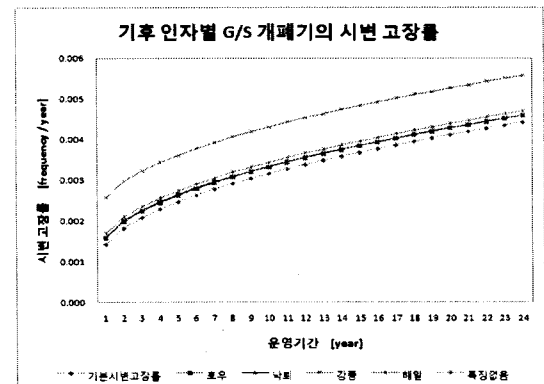
4.5 기후인자를 고려한 배전 설비의 고장률 분석 결과

4절의 내용을 바탕으로 배전 설비의 기후별 고장률 분석을 실시하였다. 본 논문에서의 기후 구분은 총 5개의 기후 상태를 가정하였으므로 각 배전 설비 별로 고장률이 각각 존재하게 된다. 사례연구는 OC

전선과 G/S 개폐기에 대한 고장률을 분석하였고 그림 6에 나타내었다. 나머지 배전 설비들도 4절에서 설명한 방법을 이용하면 어렵지 않게 구할 수 있다.



(a) OC전선



(b) G/S 개폐기

그림 6. 기후인자를 고려한 시변고장률
Fig. 6. The time varying failure rate considering climate factor

기본 시변고장률은 기후 상태에 관계없이 기후요소를 고려하지 않고, 전체 고장자료에 근거하여 추정한 고장률을 의미하고 나머지 항들은 각각의 기후 상태에 따른 보정된 고장률을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전 시스템을 구성하는 기기들에 대한 설치 현황자료와 고장 자료 및 각 지점의 현장

기후인자를 고려한 배전계통 설비의 시변 고장을 추정

관리자들을 대상으로 한 설문조사 자료를 이용하여 기기별, 연도별, 기후별 고장률을 예측하였다.

설비 운영 측면에서 살펴보면 배전기기의 설치된 지역이 서로 상이하여 동일한 사용연수를 가진 설비라 하더라도 고장률이 서로 다르게 나타나지만 이러한 현실을 적절하게 반영하지 못했다는 한계점을 가지고 있었다. 이에 본 논문에서는 기후적 특성을 반영하는 설비 고장률을 예측함으로써 설비의 고유 특성뿐만 아니라 설치되어 운영되는 지역의 기후 특성 요소까지 반영된 고장률을 도출하였다. 이를 바탕으로 설비에 대한 관리 및 운영계획을 더욱더 체계적이고 과학적으로 수립하고 적용하는 데 많은 효과가 있으리라 사료된다. 또한 배전계통의 투자 계획 수립에 대상 지역의 기후 특성이 반영됨으로써 보다 현실적이고 합리적인 계획 수립 및 대안 평가를 마련하였다는 것에 그 의의가 있을 것이다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- [1] R. Billinton and P. Wang, "Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999.
- [2] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, et. al, "Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 1991.
- [3] Jong-Fil Moon, Jae-Chul Kim, Hee-Tae Lee, Chang-Ho Park, Sang-Yun Yun, Sang-Seung Lee, "Reliability Evaluation of Distribution System through the Analysis of Time-Varying Failure Rate", IEEE PES General Meeting, Denver, USA, June, 2004.

- [4] Jong-Fil Moon, Jae-Chul Kim, Hee-Tae Lee, Sang-Seung Lee, Yong Tae Yoon, Kyung-Bin Song, "Time-varying failure rate extraction in electric power distribution component", PMAPS Conference, Stockholm, Sweden, June, 2006.
- [5] Sebastian Martorell, Ana Sanchez, and Vicente Serradell, "Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 64, 1999.
- [6] Thomas F. Hassett, Duane L. Dietrich, and Ferenc Szidarovszky, "Time-Varying Failure Rates in the Availability & Reliability Analysis of Repairable Systems", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, No. 1, Mar. 1995.
- [7] 한국전력공사 배전처, "점전관리 통합시스템 사용자 안내서".
- [8] E. A. Elasyed, "Reliability Engineering", Addison Wesley, 1996.
- [9] John Endrenyi and George J. Anders, "Aging, Maintenance, and Reliability", IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 4, No. 3, pp. 59-67, May/June 2006.
- [10] 한국전력공사 전력연구원, 신뢰성 및 경제성을 고려한 배전계통 최적투자계획 수립 모델 및 시스템 개발(최종 보고서), 한국전력공사, 2007년.

◆ 저자소개 ◆

김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학부 교수. [주 관심분야] 배전계통 신뢰도, 스마트배전계획 및 운영, 전력설비 진단, 전기철도, 전력IT, 분산전원, 고효율기기등

E-mail : jckim@ssu.ac.kr