

확률적 기법을 이용한 가공 송전선로 도체의 장력감소 계산

조종만*, 배인수**, 김동민**, 김진오**
 한국전력거래소*, 한양대학교 전기공학과**

Assesment of the reduction in tensile strength of an overhead transmission line's conductor by probabilistic method

Jong-Man Jo*, In-Su Bae**, Dong-Min Kim**, Jin-O Kim**
 KPX*, Dept. of EE. Hanyang University**

Abstract - 본 논문에서는 송전선로 도체의 경년열화(thermal deterioration)를 평가하기 위해 확률적 기법을 도입하였다. 선로의 경년열화를 나타내기 위해 선로의 장력(tensile strength) 감소를 계산하며, 이는 해당 선로의 과거 전류 이력과 선로가 위치한 지역의 과거 기상데이터 및 부하량의 변화를 통해 산출한다. 첫째로, 과거 데이터를 통해 확률분포를 구한 후 모든 데이터는 통계적으로 서로 간에 독립적이라는 가정 하에 Monte-Carlo Simulation을 수행하였다. 둘째로, 과거 데이터의 이력을 시간순서대로 추종하여 1시간 단위로 장력변화를 누적하는 순차적 계산(dynamic calculation)을 수행하였으며 그 결과를 MCS 기법과 비교하였다. 주로 백분율로 표현하는 도체의 장력 감소분은 송전선로의 수명을 결정하는데 사용할 수 있는 중요한 지수이며, 계통계획에 있어서 유용한 기준으로 사용할 수 있을 것이다.

1. 서 론

송전선로를 통한 전력조류는 안정도 위반이나 계통상황에 따른 용량제한, 송전선로 근처 주민에 대한 소음문제와 TV 전파방해, 장력감소나 경년열화로 인한 기계적 특성감소, 지표면에 대한 고온 및 전자기장과 같은 환경문제 등 여러 요소를 고려하여 결정한다. 그 중 송전선로에서 발생하는 고온으로 인한 선로의 장력감소는 송전선로의 수명을 결정하는 변수이다. 즉, 최악의 기상상황(고온, 무풍)에서 선로의 전류 정격으로 총 선로수명 기간(약 36년) 동안 운전할 경우 초기 선로상태에 비해 10%의 장력감소가 발생한다.

전력시장의 경쟁체제에서는 전력 사용량이 증가함에 따라 새로운 선로를 건설하기보다는 기존 송전선로의 전류 정격을 증가시키는 것이 경제적인 관점에서 유용하다. 가공 송전선로의 전류 정격을 계산하기 위한 기존의 결정론적(deterministic) 기법은 최악의 상황을 가정하는 방식이다. 이에 비해 기온, 풍속, 풍향과 같은 파라미터를 재평가하고 확률적 기법을 도입하면 결정론적 기법으로 정해진 선로의 전류 정격을 다소 증가시키는 것이 가능하다. 기존에 설치되어 운영 중인 선로의 장력감소를 알 수 있다면, 현재 시점에서 선로수명이 다할 때까지 전류용량을 증가시켜도 선로의 기계적 제약조건을 위반하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

Yukio Mizuno[1]는 Nagoya 기상관측소와 Chubu 전력회사의 데이터를 통해 10년 동안의 선로 장력감소를 계산하였지만, 1년의 데이터를 10년 동안 반복적으로 적용하였고 풍향은 고려하지 않았다. Kwabena Adomah[2]는 Matsumoto 기상관측소의 4년 간 기상데이터를 재적용하고 풍향을 고려한 후, 일정한 부하증가를 가정하여 [1]의 연구결과를 개선하였다. Vincent T Morgan[3]은 기존에 발표된 장력감소 관련 연구의 계산기법을 비교, 정리하여 실제 실외에 노출되어 사용하는 송전선로에 적합한 장력감소 계산기법과 파라미터를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 열평형 방정식

열평형 방정식은 선로에서 발생하는 열과 외부로 방출되는 열이 평형을 이루는 상태를 표현한다[4].

$$q_j + q_s + q_m + q_c = q_r + q_w \tag{1}$$

여기서, q_j 는 전력조류로 인한 joule열, q_s 는 태양열, q_c 는 대류냉각, q_r 는 방사냉각을 말한다. 그 외 magnetic열 q_m corona열 q_c 증발냉각 q_w 는 가공선로를 고려할 때는 무시한다. 즉, 가공 송전선로에 대한 열평형 방정식은 태양, 전력조류로 인해 발생하는 열과 바람으로 인한 대류냉각, 자연적인 방사냉각이 평형을 이루는 상태를 말한다.

2.1.1 Joule열(Joule Heating)

선로에 흐르는 전류 I 와 선로의 저항 $R(T)$ 로 인해 발생하는 열은 식 (2)와 같으며 선로의 저항은 선로온도 T_c 의 함수로서 식 (3)과 같다.

$$q_j = I^2 R(T) \tag{2}$$

$$R(T) = \left(\frac{R(T_{High}) - R(T_{Low})}{T_{High} - T_{Low}} \right) (T_c - T_{Low}) + R(T_{Low}) \tag{3}$$

2.1.2 태양열(Solar Heating)

가공선로가 태양에너지를 직접적으로 받아서 발생하는 열은 다음 식과 같이 구한다.

$$q_s = \alpha Q_s \sin(\theta) A \tag{4}$$

$$\theta = \cos^{-1} \{ \cos(H) \cos(Z_c - Z) \} \tag{5}$$

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \tag{6}$$

여기서 α 는 선로의 흡수율, Q_s [W/ft²]는 heat flux, A [ft²]는 태양과 접하는 도선의 단위 길이당 면적, H_c [degree]는 태양고도, Z [degree]는 태양의 방위각, Z_c [degree]는 선로의 방위각이다. 태양열 계산에서 이용하는 선로의 흡수율과 방사냉각 계산에서 이용하는 선로의 방사율은 노화정도에 따라 약 0.23~0.91의 값을 가지며, 실제 가공선로의 표면 상태를 알 수 없는 경우는 둘 다 0.5를 사용한다. 흡수율이 방사율보다 노화에 민감하게 증가하기 때문에 노화가 어느 정도 진행된 선로에 대해서는 흡수율 0.7, 방사율 0.5로 가정하기도 한다.

선로의 높이에 따른 태양열의 증가는 선로의 해발고도를 $X[\text{ft}]$ 라 할 때 $(1+3.5 \times 10^{-5}X - 1.0 \times 10^{-9}X^2)$ 만큼 증가한다.

2.1.3 대류냉각(Convective Cooling)

대류냉각은 풍속의 크기에 따라 강제대류냉각 (q_d , q_{ϕ})과 자연대류냉각 q_{ϕ} 으로 나눌 수 있으며, 강제대류냉각은 풍속의 크기에 따라 고풍영역 q_d 과 저풍영역 q_{ϕ} 로 다시 나눈다. 이 3가지 대류냉각 중 가장 큰 값을 가지는 영역이 대류냉각을 지배하며 그 값을 대류냉각으로 정한다.

$$q_d = \left\{ 1.01 + 0.371 \left(\frac{D_p V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right\} k_f (T_c - T_a) \quad (7)$$

$$q_{\phi} = 0.1635 \left(\frac{D_p V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} k_f (T_c - T_a) \quad (8)$$

$$q_{\phi} = 0.283 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25} \quad (9)$$

$$T_{film} = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (10)$$

$$\rho_f = \frac{0.080695 - 0.2901 \times 10^{-5} H_c + 0.37 \times 10^{-10} H_c^2}{1 + 0.00367 T_{film}} \quad (11)$$

$$\mu_f = 0.0415 + 1.2034 \times 10^{-4} T_{film} - 1.1442 \times 10^{-7} T_{film}^2 + 1.9416 \times 10^{-10} T_{film}^3 \quad (12)$$

$$k_f = 0.007388 + 2.27889 \times 10^{-5} T_{film} - 1.34328 \times 10^{-9} T_{film}^2 \quad (13)$$

여기서 $D[\text{in}]$ 는 선로의 지름, $V_w[\text{ft}/\text{sec}]$ 는 풍속, T_a [$^{\circ}\text{C}$]는 선로 주위의 기온, $\rho_f[\text{lb}/\text{ft}^3]$ 는 공기밀도, $\mu_f[\text{lb}/\text{ft} \cdot \text{hr}]$ 는 공기의 absolute viscosity, $k_f[\text{W}/\text{ft}]$ 는 공기의 열도전율을 말한다.

무풍영역인 자연대류냉각과는 달리 강제대류냉각은 선로와 바람이 이루는 각도에 따라 냉각의 정도에서 차이가 난다. 이는 선로와 바람이 이루는 각 ϕ 를 이용하여 식 (14)와 같이 표현하며, 식 (14)는 강제대류냉각에 관한 식 (7), (8)에 곱해서 사용한다.

$$K_c = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi) \quad (14)$$

2.1.4 방사냉각(Radiative Cooling)

$$q_r = 0.138 D^3 \left\{ \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (15)$$

여기서 ϵ 는 가공선로의 방사율로서 2.1.2절에서 설명한 바와 같이 노화 정도에 따라 0.23~0.91 값을 가지고 일반적으로 0.5로 가정한다.

2.2 가공 송전선로의 온도

가공선로의 경년열화로 인한 장력감소를 구하기 위해서는 열팽형 방정식을 통해 선로온도의 변화를 우선 알아야 한다. 열팽형 방정식에서 연고자 하는 결과값은 선로의 온도 T_c 이며 그 외의 값은 입력변수이다. 선로의 형태, 설치위치 등 시분변 입력변수 외에 매시간 변화하는 시분 입력변수로는 전류, 태양고도, 태양방위각, 풍속, 풍향 등이 있다. 즉, 장력감을 구하고자 하는 송전선로에 대한 기본정보 외에 각 시간별 기상데이터와 선로조류를 알 수 있다면 과거 선로온도의 이력과 분포를 산출할 수 있다. 그렇지만 열팽형 방정식을 변수 T_c 에 대해 정리하

면 단순한 다항식의 형태가 아니기 때문에 수식적으로 구하기는 힘들며 반복적인 수치해석기법을 적용해야 한다.

2.3 장력감소

Vincent T Morgan[3]은 가공 송전선로의 온도를 이용하여 장력감을 구하는 여러 기법을 논하고 있으며 그 중 Vincent T Morgan[5]이 제시하는 기법은 식 (16)과 같다. 장력감소 $W[\%]$ 는 선로 제작시 초기 장력에 대한 장력감소 백분율을 의미한다.

$$W = W_a \left[1 - \exp \left\{ - \exp \left(A + m \ln t + B T_c + C \ln \left(\frac{R}{80} \right) \right) \right\} \right] \quad (16)$$

$$R = 100 \left\{ 1 - \left(\frac{D_w}{D_0} \right)^2 \right\} \quad (17)$$

여기서, $t[\text{hr}]$ 는 선로온도 T_c 가 지속된 시간, D_w 는 선로의 지름, D_0 는 선로제작 전 draw rod의 지름을 말한다. 그 외 상수들은 선로 재료에 따라 다음의 표 1과 같이 주어진다.

표 1. 식 (16)의 상수

상수	알루미늄	6201 알루미늄 합금	구리
A	-8.3	-14.5	-7.4
B	0.035	0.060	0.0255
C	9	18	11
m	0.285	0.79	0.40
$W_a[\%]$	56	60	41

선로의 온도는 매시간 변하고 온도가 지속되는 시간도 각기 다르기 때문에 식 (16)을 바로 적용하기에는 무리가 있고, 대신 각각의 선로온도에 따른 가공 송전선로의 장력감을 계속 누적하는 형태로서 장력감소 누적치를 다음과 같이 구한다.

$$\sum W = \left(\frac{t_1}{t_1} + \frac{t_2}{t_2} + \dots + \frac{t_n}{t_n} \right)^m \quad (18)$$

여기서, \bar{t}_n 은 선로온도 T_n 에서 장력감소율이 1%가 될 때까지의 시간을 말하고, t_n 은 T_n 의 실제 지속시간을 말한다.

2.4 기상데이터

기상청의 기상데이터는 자체 형식에 따라 작성되어 있으며 매시간 관측되는 여러 데이터 중 본 논문에서 장력감소 산출을 위해 필요한 기상데이터는 기온, 풍속, 풍향, 일조이다. 각 데이터는 1시간 단위로 기록되어 있고 예외적으로 1999년 이전의 기온 데이터는 3시간 단위로 기록되어 있다. 일조데이터는 매 시간 1을 기준으로 0.1 단위로 일조시간 비율을 나타내므로, 태양열을 산출하는 식 (4)에 가중치로 적용할 수 있다. 기온은 0.1[$^{\circ}\text{C}$], 풍속은 0.1[m/sec], 풍향은 10[degree] 단위로, 3시간 단위의 계측 혹은 계측장비나 기타 이유로 인한 Null 데이터는 -999로 설정되어 있다.

2.5 Monte-Carlo Simulation

MCS에 대한 자세한 논의는 본 논문의 범위에서 벗어나므로 생략하도록 하고, 장력감을 구하는 MCS의 간

락한 순서만 살펴보도록 한다. 시변 데이터(기상데이터, 조류데이터)의 확률분포는 과거데이터를 정리하면 구할 수 있으며, 확률분포의 누적곡선을 이용하면 MCS 기법을 적용하는 것이 가능하다. 1시간 단위로 5개의 랜덤변수를 발생시켜 확률누적분포 곡선에 투영하여 전류, 기온, 풍속, 풍향, 일조데이터를 정한 후 해당시간에 대한 선로온도를 2.1절의 열평형 방정식을 통해 산출하고, 선로의 설치시점부터 현재까지 매시간 반복하여 선로온도 분포를 구한다. 선로온도 분포는 2.3절 장력감소 계산식의 입력변수가 되어 가공 송전선로의 설치년도부터 현재까지의 장력감소 백분율을 확률적 기법으로 산출하게 되는 것이다.

2.6 사례연구

국내 전력계통에 설치되어 실제로 운영 중인 가공 송전선로 1회선을 선택하여 장력감소를 구해보았다. 사례 연구를 위해 선택한 송전선로는 예산과 아산 간 154kV 송전선로이며, 예산#1과 예산#2 총 2회선으로 구성된 송전선로는 2회선이 동일한 선종이므로 그 중 예산#1 선로에 대해서만 고려하였다. 예산#1 선로는 길이 14.4km, 방위각 60도의 가공선로로서 가장 근접한 기상관측소는 천안관측소이다. 선종은 26/7 ACSR 410mm²이고 평지 76%, 산악 24%의 지형에 1978년 12월에 설치되었다.

2.6.1 천안관측소 기상데이터

예산#1 선로는 1979년 1월부터 운영되었다고 보면, 1992년 이전의 기상데이터는 1992년부터 2002년까지의 기상데이터가 반복되었다고 가정하였으며, -999로 설정된 Null 값은 바로 앞 시간의 값으로 대체하였다. 천안관측소의 1992년부터 2002년까지의 기온, 풍속, 풍향, 일조데이터의 확률분포는 다음 그림 1과 같다.

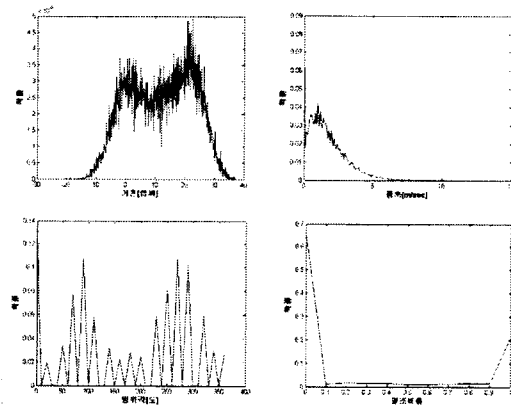


그림 1. 천안관측소 11년간 기상데이터 확률분포

2.6.2 예산#1 선로의 조류

예산#1 선로는 예산변전소와 아산변전소를 잇고 있으며 두 변전소에서 1시간 단위로 조류를 측정된 2000년 11월부터 2004년 12월까지의 데이터를 이용하였다. 각 변전소에서 구한 2개의 전류치의 평균값을 예산#1의 전류라고 하였고, 해당 선로의 노후(2005년 현재 약 27년)로 인해 2004년 후반부터 사용하지 않는 시간이 증가하여 2005년 1월부터의 조류데이터는 제외하였다.

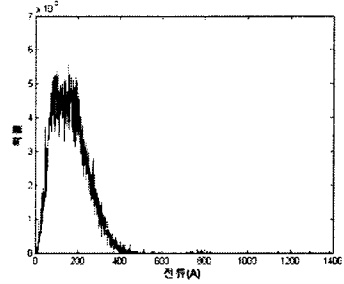


그림 2. 예산#1 선로전류 확률분포

2.6.3 사례연구 결과 - MCS

매시간 4개의 랜덤 변수를 추출한 후 그림 1의 기상데이터 확률분포를 이용하여 기상데이터를 임의로 선택하였다. 기상데이터는 년도와는 관계가 없지만, 선로전류의 경우는 계절, 주야 뿐 아니라 매년 부하증가율에 따라 일정한 증감 형태를 보이므로 선로전류는 임의 추출 대신 약 4년간의 조류 데이터를 부하증가율을 고려하여 적용하였다. MCS를 통해 구한 선로온도 확률분포는 그림 3과 같다.

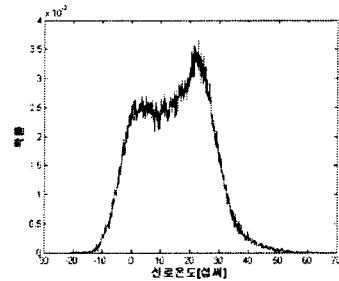


그림 3. MCS를 이용한 선로온도 확률분포

그림 3의 선로온도 분포를 식 (18)을 이용하여 x축 값인 선로온도에 대해 누적하면 그림 4와 같다.

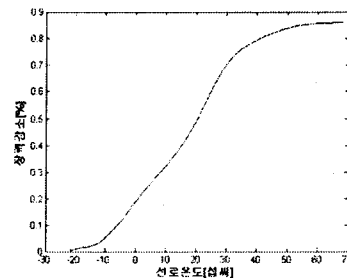


그림 4. MCS를 이용한 장력감소 백분율

결국, 1979년부터 2002년까지 24년 동안 감소된 예산#1 선로의 장력을 MCS 기법을 이용하여 구하면 0.8582[%]이다.

2.6.4 사례연구 결과 - 순차적 기법

2.6.3절에서 MCS 기법은 기상요소를 임의로 추출하였는데 이는 기상요소가 상호간에 독립적이라는 가정이 전제된다. 기상요소는 년도에 따라서는 별다른 연관성이

없지만 계절이나 주야에 따라 서로 연관성을 가지고 있다. 일반적으로 낮 시간대는 밤 시간대에 비해 기온과 일조가 높으며, 여름철은 춘추계절보다 기온과 풍속이 높다. 이런 특성을 고려할 수 있는 가장 기본적인 방법은 조류데이터와 마찬가지로 기상데이터도 시간 순서대로 순차적으로 모의하는 것이다. 데이터의 양이 방대하여 계산시간은 오래 걸리지만 가장 정확한 방법이라 할 수 있다. 예산#1 선로데이터와 천안관측소 기상데이터에 대해 순차적 기법을 적용하여 구한 선로온도의 확률분포와 이를 누적한 장력감소는 그림 5, 6과 같다.

소는 선로의 수명을 나타내는 장력감소 10%에 비해 미비하다. 이는 가공 송전선로에 대한 정격을 일정량 증가시키거나 선로의 수명을 좀 더 연장하는 것도 경제적인 대안이 될 수 있음을 나타낸다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(R01-2005-000-11214-0).

[참 고 문 헌]

- [1] Yukio Mizuno, Hisahide Nakamura, Kwabena Adomah and Katsuhiko Naito, "Assesment of thermal deterioration of transmission line conductor by probabilistic method", IEEE trans. on power delivery, vol. 13, no. 1, pp. 266-271, 1998.
- [2] Kwabena Adomah, Yukio Mizuno and Katsuhiko Naito, "Probabilistic assessment of the reduction in tensile strength of an overhead transmission line's conductor with reference to climatic data", IEEE trans. on power delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1221-1224, 2000
- [3] Vincent T Morgan, "Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of overhead conductors", IEEE trans. on power delivery, vol. 11, no. 1, pp. 345-352, 1996
- [4] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-1993.
- [5] Vincent T Morgan, "The loss of tensile strength of hard-drawn conductors by annealing in service", IEEE trans. on power apparatus and systems, vol. PAS-98, pp. 700-709, 1979.

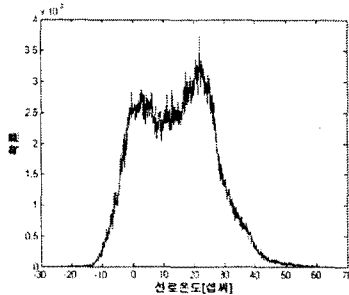


그림 5. 순차적 기법을 이용한 선로온도 확률분포

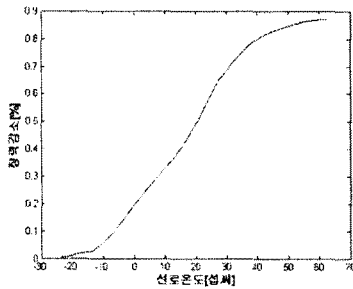


그림 6. 순차적 기법을 이용한 장력감소 백분율

순차적 기법으로 구한 24년 동안의 장력감소는 약 0.8691[%]로서 MCS 기법에 비해 높은 값을 보이고 있다. MCS 기법은 기상데이터 간의 연관성을 고려하지 않기 때문에 상대적으로 선로온도가 고온인 영역의 발생빈도가 적은 편이다. 선로온도가 고온이 되는 조건은 무풍, 고온, 고전류 등의 상황이 동시에 발생하는 경우이고 이런 경우는 기상요소를 임의로 추출하는 것에 비해 실제 기상상황에서 더 자주 발생함을 의미한다.

3. 결 론

본 논문에서는 가공 송전선로의 경년열화에 따른 장력감소를 구하는 기법을 소개하고, 국내 기상청 데이터와 계통운영 데이터를 통해 실제 운영 중인 선로에 대해 장력감소를 구하였다. 실제 데이터를 순차적으로 그대로 계산하는 방식이 정확성을 보장받을 수 있는 방식이지만 확률분포를 적용한 MCS 기법도 순차적 기법과 결과에서 큰 차이가 없다. 선로전류나 기온 등과 같은 몇 종류의 데이터는 순차적 기법을 이용하고 풍향이나 일조와 같은 데이터는 임의 추출을 하는 방식도 계산시간을 단축하면서 정확성을 보장할 수 있는 방법이다.

실제 기상상황이나 송전선로 운영상황은 선로 정격을 정하기 위한 결정론적 기법에서 가정하는 최악의 경우에 비해 여유가 있기 때문에, 과거 선로운영에 의한 장력감