

가공송전선의 송전용량을 증가시키기 위한 동적송전용량 시스템의 설계

(A Design for Dynamic Line Rating System to increase Overhead Transmission Line Capacities)

김성덕*

(Sung-Duck Kim)

Abstract

Dynamic Line Rating (DLR) techniques have been greatly worthy of notice for efficiently increasing transmission capacity as well as controlling load-flow in overhead transmission lines, in comparison with the existing power system operating with Static Line Rating (SLR). This paper describes an utilization method to implement DLR control system for old transmission lines built in the first stage using the ground clearance design standard with lower dips. The suggested DLR system is focused on designing as temperature control system rather than current/load control system. Based on several performance for conductor temperatures, it is shown that DLR system with efficiency can be implemented.

Key Words : Dynamic Line Rating, Load-Flow Control, Transmission Line Capacity

1. 서 론

21세기에 이르러 전력계통의 경제적이고 효율적인 운용이 요구되면서 새로운 송전선로를 건설하지 않고 기존 선로로 전력을 증대하는 방안을 모색하기 시작하였다. 따라서 도체의 허용전류, 이도(dip)나 전력설비의 수명에 관한 기준들이 재평가되거나 정비되었다. 도체의 허용온도, 이도나 지상고(ground clearance)

및 변압기 용량에 관한 기준들을 토대로 설계, 운용되는 가공송전선로의 송전용량(transmission capacity or line rating)도 검토되었다. 이러한 기준들은 주로 설비의 한계온도에 관련된 것들로 선로나 설비 주변의 가혹 기상조건(worst weather conditions)을 상정하여 결정한 용량들이 대부분이다. 그러나 실제로 이러한 기상조건들이 발생할 확률은 극히 적으므로 선로는 항상 여유 용량이 있는 상태로 운용되고 있다. 국내 송전선로에 주로 사용되는 ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) 도체의 최고허용온도는 90[°C]이고, 이도 및 지상고 설계기준에서 도체의 설계온도는 40 또는 75[°C]로 적용하고 있다[1-2]. 최고 허용온도란 도체를 일정한 조건 하에서 연속적으로

* 주저자 : 한밭대학교 전기전자 제어공학부 교수
Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128
E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr
접수일자 : 2011년 5월 3일
1차심사 : 2011년 5월 11일
심사완료 : 2011년 5월 31일

사용할 수 있는 한계온도를 의미하며 설계온도는 선로나 설비 등을 설계, 설치할 때 적용하는 도체의 한계온도를 말한다. 일반적으로 송전선로의 부하운용은 이러한 온도들 상호간에 관계를 적절히 조절하거나 제어하는 일이다.

도체의 연속허용전류로 규정되는 정적송전용량(Static Line Rating: SLR)[3]이나 이도 등은 모두 도체온도와 직접적인 관계가 있다. 즉 허용전류는 도체온도의 전기적 특성이라면 이도는 기계적 특성이라 할 수 있다. 송전선로나 변전설비는 전류용량으로 운용지만 직접 온도 값으로 운전 또는 관리하지 않는다. 하지만 동적송전용량(Dynamic Line Rating: DLR)은 도체의 허용온도나 한계이도 도체온도(limit dip conductor temperature) 등 직접적인 온도 관계로부터 계산된다[4-5]. 이때 DLR시스템은 일종의 정전류 제어방식인 현재의 송전계통보다 효율적인 전력공급이 가능할 뿐만 아니라, 실시간으로 가용용량을 산출, 이 용함으로써 송전용량을 증가시킬 수 있다.

DLR은 SLR로 설계, 운용되는 기존 송전시스템에 비하여 부하용량 증대나 첨두부하 관리를 효율적으로 할 수 있다. 그렇지만 DLR 제어시스템을 적용하기 위해서는 기존 설비의 보완이나 개선뿐만 아니라 루프 방식으로 계통을 연계하는 우리나라 송전망의 특성에 맞는 실용적인 방안이 필요하다. 그동안 급전의 자동화시스템이 운용됨으로써 현재에는 전력거래소에 설치되어 있는 급전자동화설비(Energy Management System: EMS)로 송전망의 전력계통을 실시간으로 감시·제어하고 있다. 그렇지만 여전히 과거 기준으로 건설, 운용되고 있는 일부 기존 송전선로 효율의 최적화 방안 마련하기 쉽지 않다. 본 연구에서는 국내의 노후 가공송전선로 계통을 토대로 DLR시스템 적용 방법을 검토한다. 도체의 허용용량 산정뿐만 아니라 도체전류를 제한할 수 있는 이도 기준이나 변압기용량 등을 고려하는 DLR시스템의 실용적 방안을 제안한다.

2. 송전선로와 DLR 특성

송전선로는 도체의 최고허용온도, 설계온도를 기준

으로 계산되는 이도, 및 지상고를 고려하여 설계된다. 이때 수용가 부하의 수급을 예측하여 변전소의 변압기 용량이나 차단기 용량이 결정된다. 선로나 관련 설비들은 전류의 상한 값이나 온도의 한계치를 적용하여 선로의 안전성이나 전력공급의 신뢰성이 확보되는 범위에서 설계된다. 이러한 관점에서 보면 현재 송전선로 계통은 일련의 시퀀스 제어로 리미터 등을 적용하는 단순한 제어시스템이라 볼 수 있다. 전력계통을 구성하고 있는 대부분 요소들의 동작특성이나 범위가 사전에 정해진 기준치로 설계되므로 일종의 결정 제어시스템(deterministic control system)이다. DLR시스템은 현재 시각의 도체온도(또는 전류)를 알고 이 정보로부터 전력계통이 허용할 수 있는 도체온도까지의 용량을 계산한다. 따라서 실시간으로 계산한 값으로 전력공급이나 수용부하를 연속적으로 조절할 수 있다. 도체의 열용량은 도체의 금속, 재료 특성은 물론 도체의 구성과 도체전류, 그리고 도체 주변의 다양한 기상요소에 의해 결정된다. 이들 요소들 중 일부는 불확실성을 포함하고 있거나 시변 특성이 지배적인 것도 있다. 따라서 도체의 열용량 또는 온도를 조절하거나 제어하는 시스템은 시스템에 개입되는 입력요소들의 처리에 의해 제어성능이 결정된다. 이와 같이 온도를 실시간으로 검출, 비교하거나 계산하고 처리해야 하는 DLR시스템은 그 구조가 아주 복잡하지만 기능은 단순한 온도제어시스템이다[6]. 이러한 온도제어 관점으로 볼 때, 온도를 측정 또는 추정으로 다양한 DLR시스템을 구현할 수 있다[4-5].

도체의 최대허용온도는 도체가 허용할 수 있는 최고 온도이다. 하지만 이도나 지상고는 도체의 설계온도를 별도로 규정하며 국내에서는 그동안 3차례에 걸쳐 설계기준이 개정되어 적용하고 있다[1-2]. 따라서 국내 송전선로는 3가지 다른 기준들이 적용된 것들이 운용되고 있다. 이들 중, 설계온도를 40[°C]를 적용한 1992년 7월 이전의 초기 이도 기준과 1997년 11월 이전까지 75[°C]를 적용한 선로들의 한계이도 도체온도는 각각 51 및 86[°C]로 ACSR의 최고허용온도인 90[°C] 이하이다[7]. 현재 부하전류에 상응하는 도체온도와 계통이 안전하게 동작되는 최고허용온도를 넘지 않는 범위에서 현재의 기상요소들을 사용하여 DLR을

결정한다. 이렇게 구한 DLR 값이 변압기나 선로의 허용부하 범위 이내에 있는 것인가를 비교하여 계통이 안전하게 운전되도록 부하전류를 조절한다.

도체를 중심으로 도체온도에 영향을 주는 기상요소와 도체종류 등으로부터 도체의 열평형방정식은 다음과 같이 주어진다[3].

$$m C_p \frac{dT_c}{dt} + I^2 R_{ac}(T_c) + Q_s = Q_c + Q_r \quad (1)$$

여기서 m kg/m는 도체의 단위길이 당 질량이며 C_p [J/kg°C]는 도체의 비열이고 $R_{ac}(T_c)$ Ω는 T_c [°C]에서의 교류저항이다. Q_s W/m는 도체가 태양으로부터 흡수하는 열이며, Q_c W/m는 대류에 의한 열방산, Q_r W/m은 방사에 의한 열방사를 나타낸다. T_c 는 도체의 최고허용온도이거나 또는 한계이도온도이다. 이때, DLR은 열평형방정식의 정상상태조건에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$I_{DLR} = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R_{ac}(T_c)}} \quad (2)$$

대부분의 국내 송전선로인 루프방식의 계통에는 각 선로들의 허용부하가 미리 결정되어 있으므로 부하조류의 조작이나 제어는 이러한 범위 내에서만 가능하다. 그러나 현재 국내에 건설된 송전선로는 다른 설계기준에 의해 건설된 2~3종류의 선로들이 복합적으로 운용된다. 물론 현재에도 도체의 최고허용온도 이내의 송전용량으로 운용되고 있으므로 이도나 지상고에 별다른 문제는 발생하지 않는다. 다만 루프계통에서는 다중선로의 부하가 2개 이상의 변전소와 연계되어 있고 또한, 대부분 송전선로는 기본적으로 2회선으로 운용하기 때문에 고장회선 부하의 건전회선 부담 등 신중한 계통운용이 요구된다. 따라서 송전선로의 이도, 변압기 용량 및 수요부하와 도체의 허용전류 사이의 조절과 운전 상태를 고려하여 DLR 제어시스템을 설계해야 한다. 그러나 방사선방식의 계통에 적용하는 방식의 DLR시스템 기법과 성능을 다중 선로에 직접 확장할 수 있으므로 본 연구에서는

단일선로가 2차변전소를 통해 급전하는 계통으로 가정한다. 또한 이도 여유가 가장 작은 1992년 7월 이전에 건설된 154[kV], 2회선, ACSR 410 복도체인 선로가 2차변전소를 통해 수용가에 전력을 공급하는 송전선로로 가정한다.

3. DLR 시스템의 설계

3.1 2회선 송전선로

초고압 송전선로는 기본적으로 2회선 이상을 병렬로 구성하여 운전한다. 2회선으로 병렬운전하면 1회선 고장 시에 각 회선마다 설치된 선로 보호용 차단기가 1회 재폐로를 시행하여 순간 혼축 등과 같은 순간 고장에는 정전 없이 전력을 안정적으로 공급할 수 있다. 또한 단선 또는 지락 등 영구고장이 발생한 경우에도 해당 차단기로 고장 회선을 분리함으로써 고장 회선의 부하가 자동적으로 건전 회선에 부담되도록 하는 운용구조를 갖고 있다. 즉 병렬 2회선 중 1개 회선이 분리되어 나머지 1개 건전회선으로 선로의 전체 부하전류가 흐르더라도 송전선로는 과부하되지 않고 또한 정전하지 않아도 전력공급이 가능하도록 시스템이 설계되어 있다. 따라서 운전 중 1회선이 고장으로 인하여 차단되는 경우에 건전회선에 고장회선의 부하가 전가되므로 상시 부하는 선로의 허용용량의 50[%] 이내에서 제한된다. 2차 변전소는 345 또는 765[kV] 선로의 특고압을 154[kV]로 강압하여 배전회로로 공급한다. 이때 2차변전소에는 45/60[MVA] 변압기, 4뱅크 설치를 기준으로 한다. 따라서 2차 변전소에는 기본적으로 180[MVA], 과부하 용량으로 최대 240[MVA]의 변압기가 설치되는 셈이다. 만약 송전선로가 154[kV], 병렬 2회선이면 ACSR 410 복도체에 대해 이 선로의 허용송전용량은 904[MVA]이고 회선 당 송전용량은 452[MVA]이다. 상시 운전은 1/2 부하로 운용되도록 규정되었으므로 226[MVA]까지 공급할 수 있다. 그러나 도체의 허용설비용량을 고려하면 최대 452[MVA] 이상의 부하를 수용가에 공급할 수 있다.

3.2 예측부하의 DLR 제어

병렬운전 154[kV], 2회선 TL(transmission line)에 대하여 1회선에 대한 2일간 예측부하(prediction load)를 그림 1과 같이 회선 당 750[A]로 가정하였다. 회선 당 연속허용전류는 1,696[A]이며 1회선에는 상시 최대부하로 1회선 부하의 50[%] 부하인 848[A]로 운전된다. 실험 기간 동안 10~40시 사이에 장시간 사고가 발생한다고 가정한다. 이때 이 선로는 고장 1회선 차단으로 인하여 건전회선에 2배의 부하가 자동적으로 부담된다. 분석선로는 한전의 공덕 TL로, 2009년의 실측부하 데이터와 대전지방기상청에서 측정된 실제 기온과 풍속 측정치를 적용하여 실제 DLR 값을 계산한 결과를 직접 이용하였다. 이 TL에 1회선 당 변압기 용량은 240[MVA]로 900[A]/회선이며, 고장 시에는 2배의 전류가 건전회선에 자동적으로 공급될 수 있으므로 고장 지속시간에는 최대 1,800[A]/회선까지 허용할 수 있다. 이 선로를 초기 설계기준으로 건설한 송전선로라 가정하면 DLR을 계산하기 위한 최대도체온도는 한계이도 도체온도인 51[°C]이다[7].

그림 1에서 보면 0~10시 사이에서는 변압기 용량으로 최대허용부하가 제한되지만 송전선로의 전력공급의 신뢰성은 문제되지 않는다. 10~40시 사이에는 1회선이 고장이 발생하여 2배의 부하를 건전회선이 담당하므로 이 회선의 부하는 750[A]의 2배인 1,500[A]가 된다. 물론 1/2 부하를 담당하는 송전선로의 도체는 최대 1,696[A]까지 공급할 수 있기 때문에 1,500[A]를 공급해도 도체는 최대허용온도를 초과하지 않는다. 그러나 26 및 32시 각 1시간 동안의 DLR은 각각 1,338[A] 및 1,182[A]로 이 기간에 도체는 그림 1(b)에서와 같이 한계이도 도체온도, 51[°C]에 도달하게 된다. 결국 예측부하 1,500[A]를 공급할 수 없으므로 선로의 건전 회선에는 1,500[A] 이하인 1,338[A] 및 1,182[A]로 부하를 줄여야 한다. 즉 변압기나 차단기 용량이 충분함에도 불구하고 선로 공급부하량을 제한해야 한다.

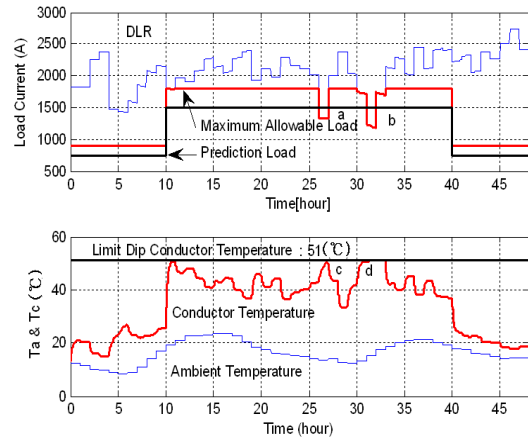


그림 1. 예측부하, DLR 및 도체온도.
Fig. 1. Prediction load, DLR, and conductor temperatures

DLR 값 이하로 부하를 제한해야 도체온도가 51[°C]를 넘어 지상고가 기준치 이하로 되는 것을 피할 수 있다. 이러한 문제들은 결정제어시스템으로 설계된 기존의 송변전설비에서는 해결할 수 없으며, 오로지 DLR시스템을 채용하여 계통을 연속적으로 감시, 제어함으로써 극복할 수 있다. 지상고 설계 시에 도체온도가 75[°C](또는 한계이도 도체온도, 86[°C])인 선로라 가정하면 DLR은 최대허용용량이나 실제 부하보다 상당히 큰 범위에서 결정된다. 이 경우에도 도체온도 및 DLR 특성은 설계온도가 40[°C](또는 한계이도 도체온도, 51[°C])인 선로에서처럼 확장할 수 있으므로 본 논문에서는 다루지 않았다.

3.3 가상선로의 적용 실험

DLR 제어시스템의 효용성을 확인하기 위하여 동일 선로의 실제 운용부하를 이용하였다. 그림 2는 분석선로에서 운용되었던 1주간의 실측 부하 특성으로 2회선 중, TL #2가 여러 번 고장이 발생한 특수한 예이다. 이 선로는 초기 설계기준으로 건설한 송전선로이지만 SLR을 기준으로 선로를 운용하더라도 2회선 부하운용에 문제가 발생되지 않았다. 그러나 앞 절에서 제시 하였던 DLR 제어시스템의 실용성을 확인하기 위하여 가상적으로 2배의 실측부하를 사용하였으며 도체나

이도에 대한 기준이나 규격은 그대로 적용하였다. TL #1은 고장이 발생하지 않은 반면에 TL #2는 1일 이상 지속된 고장을 포함하여 여러 번 고장이 발생하였다. 일반적으로 일일부하는 주간에는 높은 전형적인 벨형 부하 유형을 보였으나 고장이 길었던 3일차에는 건전 회선에도 부하는 현저하게 감소되었다. 그러나 이 선로는 병렬 2회선이므로 1회선에 고장이 발생하면 자동적으로 2배의 부하가 건전회선에 부담되었음을 확인할 수 있다.

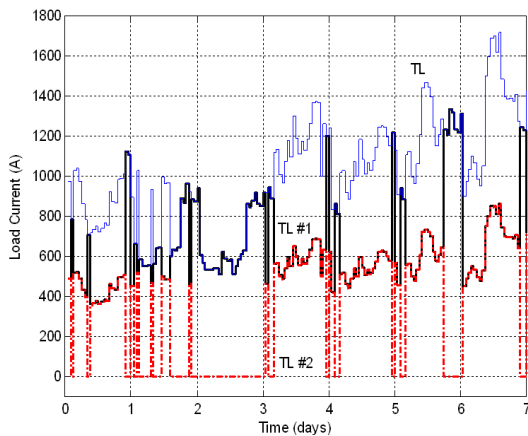


그림 2. 예제 TL의 부하 특성
Fig. 2. Load characteristics for an example TL

그림 3은 대상선로의 실제 부하와 실측 기온과 풍속을 적용하여 구한 DLR 특성이다. TL #1을 분석대상으로 하고 DLR은 한계이도 도체온도인 51[°C]을 기준으로 계산하였다. 부하를 실제 운용 부하보다 2배로 가정하였음에도 불구하고 그림 4에서와 같은 3 경우(a, b 및 c)를 제외하고는 대부분 TL #2의 고장 구간에서 정상적인 선로 운용이 가능함을 볼 수 있다. 우선, TL #2가 정상적인 경우에 TL #1이 변압기의 용량을 초과한 경우로 a 및 c 부분이다. 131시에서 TL #1 및 #2는 각각 915[A]로 최대허용용량 900[A]/회선을 초과하고, 또한 152~159시 사이에도 유사한 결과가 나타난다. 이러한 결과는 본 절에서 DLR 시스템 특성을 분석하기 위해 실측부하를 2배로 가정함으로써 발생한 것이나, 실제로 선로에서 발생한다고 하더라도 DLR 시스템으로 모니터링 관리할 수 있을 것이다.

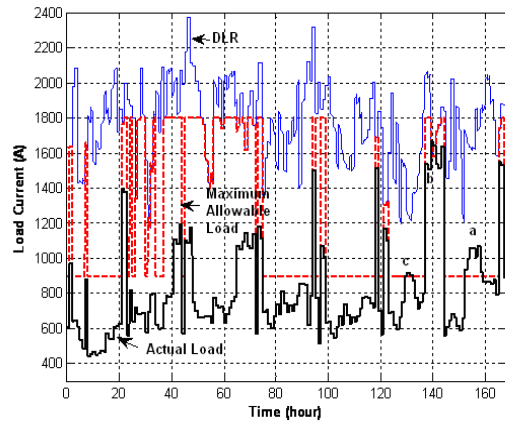


그림 3. DLR시스템의 제어 특성
Fig. 3. Control characteristics of DLR system

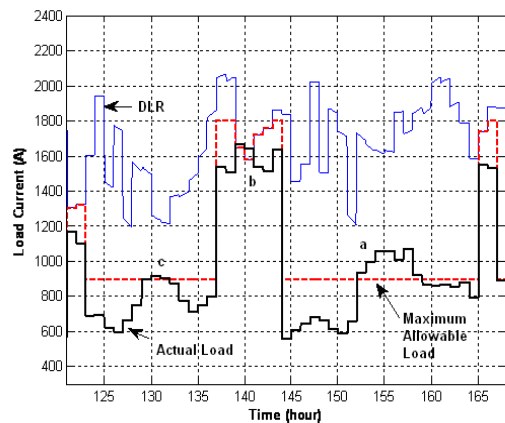


그림 4. DLR 제어시스템의 동작
Fig. 4. Operation of DLR control system

한편 1회선이 고장된 경우에 부하 특성으로 그림 4에서 139~140시 사이의 b가 문제가 되는 구간이다. 예컨대 140시에서 추정 DLR은 1581[A]인 반면, TL #1의 부하는 1,666[A]이다. 따라서 이 시간에는 도체는 도체의 열시정수, 약 15분 정도를 감안하더라도 한계이도 도체온도를 초과하게 될 것이다. 따라서 변압기 용량은 충분하더라도 부하를 제한해야 한다. 이 선로가 설계도체온도 75[°C]인 이도 설계기준으로 가설되었다면 안전 여유는 증가하여 그림 4와 같은 문제는 발생하지 않는다.

4. 결 론

가공송전선에 대한 동적송전용량 제어시스템은 정적송전용량을 중심으로 설계되어 운용되는 기존 계통 운용에 비하여 송전용량을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 계통운용의 신뢰성이나 조류제어에 효과적이다. 이러한 DLR 시스템은 SCADA 또는 EMS에서 통합 운용할 수 있다. 본 연구에서는 기존 설계기준으로 건설된 선로에 대한 동적송전용량 적용 방법에 대해 기술하였다. 선로부하는 일반적으로 전류로 설계되지만 기본적으로는 온도제어시스템이다. 따라서 동적 및 정적송전용량을 온도제어 측면에서 해석하고 실시간 부하제어를 구현하기 위한 계통 구조를 설계하였다. 2회선 송전선로를 가정하고, 도체의 허용온도, 이도 설계기준 및 변압기 용량을 고려하는 실용적인 DLR 시스템을 구성하였다. 제안된 DLR 시스템을 실제 선로를 가정, 적용하여 설계된 구조의 특성을 검토하였다. 그 결과, 기존 송전선로에 적용 가능한 DLR 제어시스템의 실용성과 효율성을 확인하였다.

References

[1] 가공송전선의 지상고 설계기준, DS 1020, KEPCO, 2003.
 [2] 가공선 이도 설계기준, DS 1211, KEPCO, 2004.
 [3] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-2006.

[4] D.A. Douglass and A.A Edris, "Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1407-1418, 1996.
 [5] L. Ren, J. Xiuchen and S. Gehao, "DLR Research for dynamic increasing transmission capacity", 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing China, 2008.
 [6] A.A. Rahim, and I.Z. Abidin, "Verification of conductor temperature and time to thermal-overload calculations by experiments", ICEE 2009. 3rd International Conference on Energy and Environment, pp. 324-329, 2009.
 [7] 김성덕, 송흥관, 장태인, "2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가 방법", 한국조명전기설비학회, 논문집 제21권, 제7호, pp. 20-28, 2007.

◇ 저자소개 ◇



김성덕(金成德)

1951년 10월 1일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1990년~1991년 Australia National University 객원교수. 2000~2001년 미국 Kansas State University 객원교수. 현재 한밭대학교 전기전자제어공학부 교수.