

가공송전선로의 비상용량 응용과 평가

Application and Evaluation of Emergency Rates in Overhead Transmission Lines

김 성 덕*

Sung Duck Kim*

Abstract

A method for applying emergency ratings to improve the reliability of power supply in ACSR overhead transmission lines is described in this paper. Due to re-regulate power industry, most power companies worldwide as well KEPCO have been searching for only economical strategies without new investment. Power demand was rapidly increasing, however, generation amount did not follow sufficiently. Hence in order to increase the transmission capacity for the existing transmission lines in case of peak load, or contingency in transmission lines, an application method of emergency ratings such as short or long term rating is proposed. If applying long term emergency rating instead of static line rating for the period of a peak load, power transmission can be increased to 10 % or more. Furthermore, it was shown that emergency rating can be effectively used in the contingency of double-circuit transmission lines and/or overload cases.

요 약

본 논문에서는 ACSR 가공송전선로의 전력공급 신뢰도를 증진시키기 위한 비상정격의 적용방안에 대하여 기술하였다. 전력산업의 재편으로 인하여 한국전력은 물론 세계의 대부분 전력회사들은 새로운 투자를 하지 않으면서 경제적인 전략들만 모색하여 왔다. 그러나 전력수요가 급격히 증가하였으나 발전량의 증가는 충분히 따라가지 못했다. 따라서 침투부하 시나 송전선로의 고장의 경우에 기존 송전선로의 송전용량을 증가시키기 위하여, 단시간 또는 장시간정격과 같은 비상용량을 적용하는 방법을 제안한다. 만약 침투부하 시, 정적송전용량 대신에 장시간 비상용량을 적용하면 10 % 또는 그 이상의 전력증대가 가능하다. 또한 2회선 송전선로 중 1회선 고장이나 과부하 경우에 비상용량이 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다

Key words : ACSR Conductor, Emergency Rating, Overhead Transmission Lines, Short/Long Term Rating, Static Line Rating, Dynamic Line Rating.

1. 서 론

송전선로의 열용량 규정을 설비운용과 계획에 이용하기 위하여 전력계통의 허용송전용량(transmission capability)의 평가와 실용화 방안이 필요하다. 최근에는 발전 예비전력이 불충분한 시간에 계통 침투부하를 줄이거나 비상운전 상태에서 송전선로 부하를 감

소시키기 위한 부하관리시스템을 개발하고 있다[1]. 허용송전용량은 장거리 송전선인 경우에 SIL (surge impedance loading)이나 안정도에 의해 제한되지만 주로 100 km 이하인 국내 단거리 송전선에는 도체의 열용량(thermal rating)으로 제한된다.

일반적으로 송전용량은 도체의 정격과 이도 특성을 고려하여 결정한다. 이때 보수적인 조건들로 규정된 열용량, 즉, 정적송전용량(Static Line Rating: SLR) 역시 송전허용용량을 불필요하게 제한하고 있다. 이러한 제약을 부분적으로 완화시키는 방안으로 비상용량 또는 비상정격(emergency rating)이 도입되었다[2]. 비상정격은 송전선로의 돌발 사고를 방지하기 위해 수행되는 최고정격을 의미한다. 지속시간

* Dept. of Electronic and Control Eng. Hanbat National University
Email : sdkim@hanbat.ac.kr
Tel : (042) 821-1135 Fax.: 042-821-1128
Manuscript received Aug. 21, 2014; revised Oct. 17, 2014; accepted Oct. 20, 2014.

(duration)이 수십 분인 단시간 비상정격/단시간정격(short term emergency rating)과 24 시간 이하인 장시간 비상정격/장시간정격(long term emergency rating)을 규정하여 적용한다. 비상정격을 도입하는 방법 이외에도 SLR의 한계를 극복하기 위한 방법은 기존의 기상조건을 몇 단계로 구분하여 산출한 용량표에서 SLR을 선택 적용하는 방법이나 DLR(Dynamic Line Rating: 동적송전용량)이란 실시간 열용량을 이용하는 방법 등이 있다[2],[3]. 일반적으로 비상용량은 과부하 지속시간에 따라, 장, 단시간정격으로 규정하고 있으나 그 기준 및 운용에 신뢰성이 확보되지 않은 상태이다.

비상시 계획된 시간에 과부하로 운전할 목적으로 단시간 비상정격을 실시간 운전에서 채용하려면, 과부하선로의 부하를 사고 시점으로부터 15 분 이내에 장시간정격 이하로 줄일 수 있는 설비능력이 있어야 한다[4]. 만약 예정된 단시간정격 지속시간에 대하여 전력계통의 가용용량(operable capacity)이 단시간정격 과부하를 공급하기에 충분하지 않다고 판단된다면, 운용자는 사고 후 즉시 장시간정격을 적용해야 된다. 장시간정격은 정상상태에서 계산된 고정된 값으로 이런 보수적 방법을 채용하면 계통 송전용량 이용률이 적어 설비의 운용이 비경제적이 된다. 따라서 본 연구에서는 침두부하 운용 시나 과부하 운전이 필요하다고 판단되는 경우에 전력공급의 안정성을 확보하기 위한 비상정격의 도입과 그 응용 방안을 제안한다.

2. 비상정격 특성

2.1 도체의 열용량

ACSR 도체의 전류용량은 도체온도에 영향을 주는 기상요소, 도체종류와 전류로부터 상정된 도체의 열평형방정식으로 주어진다[5]. 이때 최고허용 도체온도(maximum allowable conductor temperature)로 DLR이 결정된다. 대부분의 국내 송전선로인 루프방식의 계통에는 각 선로들의 허용부하가 미리 결정되어 있으므로 부하조류의 제어는 이 범위 내에서만 가능하다. 그러나 현재 국내에 건설된 송전선로는 다른 설계기준에 의해 건설된 2-3 종류의 선로들이 복합적으로 운용된다. 루프 계통에서는 다중선로의 부하가 2개 이상의 변전소와 연계되어 있고 또한, 대부분 송전선로는 기본적으로 2 회선으로 운용하기 때문에 고장회선 부하의 건전회선 부담 등 신중한 계통운용이 요구된다.

2.2 비상정격의 도입

비상용량은 비정상적인 상태나 조건, 예컨대, 일시적인 사고(contingency) 선로에서 고정시간에 공급되는 전류를 의미한다. 따라서 과부하 요구에 대한 전력수급에 대한 조치가 필요하다. 이러한 조치는 부하의 분배나 단속시간의 조절 등 설비와 보호계통과 원활한 협력을 요구한다. 따라서 비상용량의 결정에는 도체의 최고허용온도가 정의되어 사용된다. 비상용량은 한시적 용량으로 적용시간 또는 지속시간은 수 십분에서 24 시간까지 다양하다. 이때 지속시간은 과부하 시간이나 비상상태가 지속되는 기간으로, 경우에 따라 고장, 사고, 또는 운전시간 등으로도 사용된다. 지속시간의 길이에 따라 장시간정격과 단시간정격으로 분류한다. 장시간정격은 정상상태에서 결정되는 값인 반면, 단시간정격은 과도해석에 의해 결정되는 값이다.

단시간정격은 전력공급의 안정성을 확보하기 위하여 사용하기도 하지만 주로 짧은 시간의 사고에 대처하기 위한 수단으로 이용한다. 또한 단시간정격은 병렬 2 회선 송전선 중 1 회선의 정지나, 그 밖의 사고 발생빈도가 비교적 적은 상태에서 단시간허용 전류를 초과하지 않는 전류를 단시간 동안 인가할 수 있는 전류이며, 사고나 비상상태에서 필요한 과도 특성을 나타낸다. 대략 수십 분 이내의 짧은 시간에 부하의 공급이나 변화량이 결정되기 때문에 운용자가 미리 예측하거나 판단하여 조치하기는 쉽지 않다. 하지만, 장시간 비상용량에 비해 큰 부하용량을 수용할 수 있는 장점이 있다. 단시간정격은 짧은 지속시간 때문에 초기상태 값에 따라 결과가 민감하게 변한다. 이러한 초기조건은 상시용량의 70~100 % 등 계통구성이나 운용방식에 따라 전력회사마다 다르게 선정한다. 반면, 장시간정격은 선로의 일시적인 사고로 인해 과부하 운전이 필요한 경우에 일정 시간에 공급하는 전류다. 또한, 침두부하 운용이나 과부하 운전, 선로보수 등 기타 상황에서 비상운전이 필요하다고 판단되는 경우에 적용한다. 물론, 상시용량을 결정하는데 사용하는 규정조건도 다르므로 단시간정격, 비상정격 등의 규정, 운용 조건도 역시 다양하다. 한국전력에서는 지속시간을 8 시간으로 하고 최대허용온도는 100 °C로 규정하고 있다. 또한, 과도정격으로 허용시간 15 분 이내에 최대허용온도, 120 °C를 넘지 않는 전류를 단시간허용전류로 새롭게 규정하였다.

2.3 2 회선 송전선로의 비상용량

전형적으로 병렬 2 회선 송전선로는 1 회선 고장 발생시점에서 고장회선의 부하가 건전회선으로 자동 부담되도록 설계, 운용된다. 고장 이후 건전회선에는

고장지속시간 동안 2 회선 부하가 흐른 후, 타 선로의 부하를 분산시키는 선로 절체작업 등을 통해 건전회선이 과부하가 되는 상황을 미리 해소하는 형태로 운영하는 것이 일반적이다. 이를 위해서는 고장 발생시점을 어떻게 보는가에 따라 단시간허용전류가 영향을 많이 받게 되는데 국내 설계기준으로는 연속허용전류의 80 % 정도 부하에 해당하는 도체온도 75 °C를 고장발생시점으로 적용하였다. 예컨대, ACSR 410 mm² 도체를 사용한 2 회선 선로에서 80 % 부하(678 A)가 걸린 상태에서 1 회선이 고장이라면 건전회선에 1356 A가 흐르게 된다. 이 전류는 해당 도체의 단시간정격, 1269 A보다 크므로 과전류차단기에 의해 고장 순간에 부하를 차단 또는 배분하여야 한다. 만약 과전류 릴레이 대신 한시계전기가 설치되어 있으면 이 전류가 흐른 15 분 시점에서 도체온도는 130 °C에 도달하는 결과가 나타난다.

3. 비상용량 시스템의 설계

3.1 분석 선로

장, 단시간 비상용량을 적용하는 경우 그 실용성을 확인하기 위하여, 한국전력의 대전전력관리처 관할 공주-덕진 TL에서 1 년간 측정된 시간부하를 기초분석 데이터로 이용하였다. 이 선로는 154 kV, ACSR 410 mm² 복도체 2 회선 선로이다. 도체온도를 추정하거나 DLR을 계산하기 위하여 선로 근처의 기상관측소에서 동일시기에 측정된 기상 데이터를 이용하였다. 기상데이터 중 기온과 풍속은 1분 평균치로 이용하였고 시간 단위로 주어진 부하는 부하유형을 고려하여 분 단위 데이터로 변환하여 사용하였다. 분석선로는 2 회선 부하 운용과 고장 시의 회선 부하 전담 등의 동작은 정상적이었으나, 침두부하 시 비상정격 적용 가능성이나 고장 시 장, 단시간 비상정격의 응용 결과는 상정된 조건을 토대로 얻은 결과들이다.

3.2 2 회선 송전선로 적용

송전선로는 기본적으로 2 회선 이상을 병렬로 구성하여 운전한다. 2 회선으로 병렬운전하면 운전 중 1 회선이 고장으로 인하여 차단되는 경우에 건전회선에 고장회선의 부하가 전가되므로 2 회선의 회선 당 상시부하는 선로의 최대허용용량의 50 % 이내에서 제한된다. 그러나 고장 발생 후에 선로가 15 분 단시간 비상용량으로 전환되면 이 선로는 150 % 부하까지 부담할 수 있으므로 상시부하를 75 %까지 높일 수 있다. 즉, 상시 최대 75 % 부하로 운용하다가 1

회선의 고장으로 2배의 전류가 흐르더라도 계통은 15 분 후에 장시간 허용용량이나 연속허용용량 운용 상태로 부하를 조절할 수 있어야 한다. 따라서 과부하의 분산 및 분배가 적절히 이루어지는 계통으로 구성해야 한다.

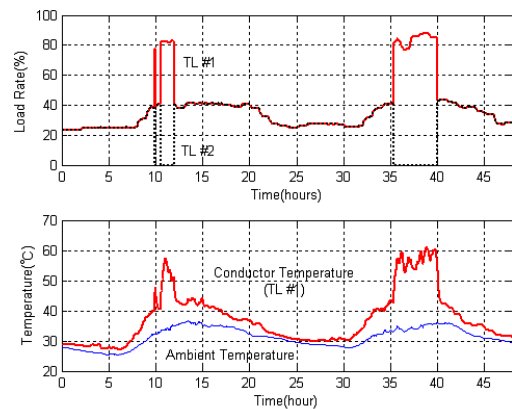


그림 1 2 회선 송전선로의 부하와 도체온도 특성

Fig. 1 An example of performances of loads and conductor temperature in a double-circuit transmission line

침두부하가 예상되는 시간에 비상정격을 적용하고 그 효율성을 확인하기 위하여, 그림 1과 같이 실측 부하에 일부 시간 동안(09:50-10:00, 10:30-12:00 및 35:20-40:00) TL #2에 사고가 발생하는 것으로 상정하였다. 또한, 가혹조건을 상정하여 기온도 실온에 비해하여 증가시켰다. 사고 기간 동안에는 TL #2의 전류는 0이고 TL #1의 전류는 사고 전 운전용량의 약 2배 정도로 약 88 %의 전류가 흐른다. 사고회선 부하가 건전회선에 부담되면 도체온도는 상승하여 대략 61 °C가 되어 도체의 최대허용온도 90 °C 이하로 안전한 전력공급이 가능함을 알 수 있다.

3.3 침두부하 제어

상시 전력공급 예비율은 15 %가 적정한 수준이나 최대전력부하 시 예비율이 5 % 이하이면 단계별 비상수급조치가 필요하다. 송전선로에 대해서도 침두부하 시 안정한 전력수급을 위하여 비상용량을 운용할 수 있다. 통상적으로 가혹조건에서 주어지는 SLR에 대하여 장시간 비상정격(100 °C에서 산정) 값은 ACSR 410 mm² 도체의 연속허용전류, SLR에 대해 장시간정격은 110 %이며 단시간정격은 150 %이다. 따라서 침두부하가 예측되는 날에 주간 시간대에 송전용량을 8 시간 또는 최대 24시간 장시간 동안 비상용량으로 운용할 수 있다. 물론, 장시간 비상용량은 도체온도 100 °C에서 계산된 것으로 한정된 시간에 적

용한다. 그렇지만 IEEE Standard 738[5]에서는 동일한 ACSR 도체의 연속허용온도를 국내의 90℃와 달리 100℃로 가정하였으므로 8시간과 같은 일정 시간이 아닌 연속시간 정격으로 이용할 수도 있다. 장시간정격을 규정하는 도체의 최대허용온도나 연속허용온도는 도체의 어닐링과 관계가 있다. 그렇지만 첩두부하 기간과 같은 한시적 적용은 도체수명 감소나 이도 처짐 등에 치명적 문제를 초래하지는 않을 것이다. 더구나 첩두부하가 예측되는 시기 수일 동안에 100℃ 장시간 비상용량 적용은 전력계통 운용상에도 별다른 문제가 없다. 결과적으로 첩두부하 기간에 대한 비상운용 하에서는 적어도 10% 정도의 선로 송전용량을 확보할 수 있는 것이다. 따라서 송전선의 첩두부하에 충분한 예비전력을 확보함으로써 전력공급의 신뢰성 문제는 발생되지 않을 것이다.

그림 2(a)에서와 같이, 최대수요전력이 예상되는 날에 09시부터 8시간 장시간 비상용량으로 운용하고 8시간 후인 17시 이후 24시까지 연속허용용량, SLR로 운용한다고 가정한다. 즉, 첩두부하가 예측되는 당일의 9:00-24:00까지 선로운영자가 사전에 비상정격으로 조치한 것이라 가정한다. 여기서 장시간 비상정격은 장시간 허용전류 939 A로 연속허용전류인 SLR, 848 A의 110%이다. 첩두부하 관리 선로는 9:00-24:00까지 적어도 이 선로에 부하가 과부하가 될 가능성이 있으며 그림 2(a)와 같이 부하공급이나 재분배가 가능하다고 가정한다.

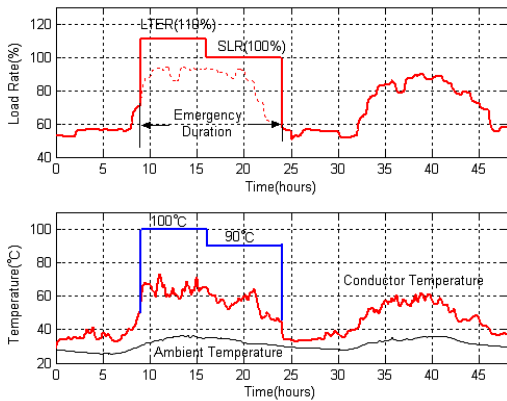


그림 2 비상정격의 적용과 도체온도 추정
Fig. 2 Adoption of emergency rating and estimation of its conductor temperature

그림 2(b)는 첩두부하 시 비상용량을 적용하였을 경우에 실제 기온과 풍속 및 비상부하를 사용하여 추정된 도체온도 특성을 나타낸다. 국내에서는 송전선로나 전력설비의 통상적인 운용에 실시간 DLR을 적용하지 않으며 특정 조건에서 규정된 값들로 일정 기

준값으로 운용된다. 따라서 가혹조건에서 계산된 SLR이나 장시간비상정격 등을 그림 2(a)와 같이 공급한다고 하더라도 도체온도는 정격의 최대허용온도, 90이나 100℃에 도달하지는 않는다. 이 결과로부터, 09:00으로부터 이후 15시간 동안 장시간비상정격(110% 과부하 전류) 및 SLR(100% 최대허용용량)로 부하를 분배하더라도 전력을 안정하게 공급할 수 있다는 것을 알 수 있다.

SLR의 한계를 해결하는 대안으로 과부하 요구에 장, 단시간 허용전류를 이용하는 방법을 검토하였으나 DLR 채용도 유용한 방법일 수 있다. 이 방법은 도체의 전류와 주위 기상요소를 실시간으로 모니터링하여 도체가 열평형 상태에서 최대허용온도에 도달할 수 있는 전류를 계산하여 공급한다. 일반적으로 고정된 값으로 규정하는 SLR이나 비상정격 등은 가혹조건에서 결정된 것으로 극한값으로 주어진다. 그러나 가혹조건이 실제로 발생할 위험확률은 거의 없으므로 기존 송전선로는 상당한 부하공급이 매우 낮으므로 여유가 있다. DLR 구현에는 여러 가지 어려움이 존재하나 과부하나 고장 시 또는 예측부하 관리, 그리고 송전용량 증대 등에 탁월한 성능을 보인다.

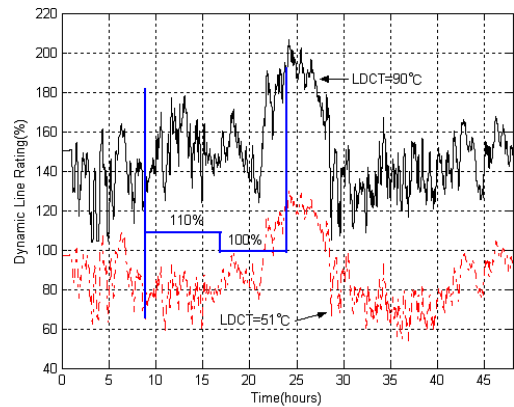


그림 3 한계이도도체온도에 의한 DLR 특성
Fig. 3 DLR performance for different limit dip conductor temperatures

전형적으로 송전용량은 도체의 허용온도뿐 만 아니라 온도에 의한 이도에도 영향을 받는다. 물론, 송전선로의 이도나 지상고 기준에서 규정하는 도체의 설계온도도 DLR 계산에 고려해야 한다. 일반적으로 ACSR 도체의 최고허용온도 90℃ 이하에서는 한계이도 도체온도(Limit Dip Conductor Temperature: LDCT)에 의해 DLR이 제한된다. 본 연구에서는 이도 기준에 의한 도체정격은 다루지 않지만, 참고로 한계이도도체온도가 51℃ 및 90℃인 경우에 산정된 DLR 특성을 그림 3에 나타낸다. 이 결과로부터 한계

이도온도가 51 °C인 경우에는 그림 2(a)와 같은 비상용량 운용이 불가능하므로 지상고 기준이 낮은 선로의 송전용량 문제는 별도로 규정되어야 한다.

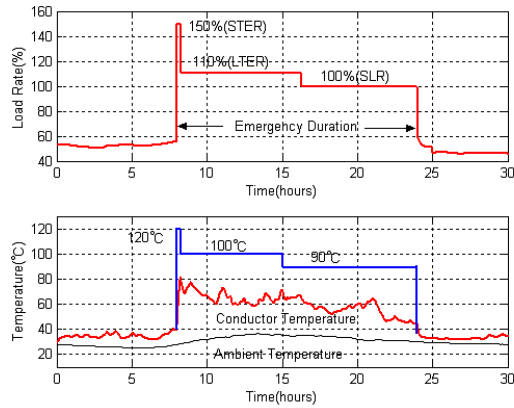


그림 4 비상용량의 적용

Fig. 4 An application of emergency rating

앞에서 기술한 바와 같이, 병렬 2 회선 송전선로의 고장이나 첩두부하 발생 또는 과부하가 요구되는 시기에 안정한 계통운용을 위하여 비상용량을 사용할 수 있었다. 비상용량의 특징 중 다른 하나는 부하의 가용용량으로 부하 재분배나 공급이 가능한 계통인 경우에 상정사고에 적용하는 것이다. 그림 4(a)에서와 같이, 8 시부터 15 분간 150 %의 단시간 비상용량을, 그 후 8 시간을 110 %의 장시간 비상용량 그리고 그 이후 24시까지 연속허용용량, SLR로 운전한다고 가정한다. 이 경우에 실측 기상요소와 전류에 의한 도체온도 특성은 그림 4(b)와 같다. 결국 선로운용자는 과부하가 요구되는 시간에 적절한 비상용량을 예측하여 적용하면 안정한 계통운용이 가능함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

전력산업의 재편 및 신규 송전선로 건설의 어려움에 따라 경제적이고 합리적인 운용을 강화함으로써 발전설비나 송변전설비의 신규 투자가 억제되어 왔다. 전력회사는 기존설비의 운용능력을 제고하고 효율을 극대화하는 방안을 모색하게 되었다. 본 연구에서는 기존 송전선로의 부하정격을 재평가하고 첩두부하 시나 일시적 고장 등의 시기에 비상용량의 적용 가능성을 검토하였다.

도체의 연속허용전류인 SLR은 보수적 기준에 의해 결정되어 송전용량을 증가시키거나 비상사태에서 전력공급의 신뢰도를 보장하기 어렵다. 이러한 SLR의 한계를 해결하는 대안으로는 장, 단시간 허용전류

를 이용하거나 비상정격을 운용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 국내 기준을 토대로 비상용량을 15 분 단시간정격과 8 시간 장시간정격으로 구분하고 실제 선로에 적용하여 그 가능성을 분석하였다. 첩두부하 시에 장시간 비상용량을 적용함으로써 적어도 10 % 이상의 전력을 증대시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 기존 선로의 송전능력에 단시간 또는 장시간 비상용량을 적절히 응용함으로써 첩두부하 관리나 과부하운용과 같은 비상운용 조건에서도 전력공급의 신뢰도를 유지할 수 있음을 입증하였다.

References

- [1] S. Maslennikov, and E. Litvinov, "Adaptive emergency transmission rates in power system and market operation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 923-929, 2009.
- [2] Bare Overhead Transmission Conductor Ratings Transmission and Substation, Design Subcommittee Conductor Rating Task Force, PJM Interconnection, LLC, November, 2000.
- [3] L. Ren, J. Xiuchen and S. Gehao, "Research for dynamic increasing transmission capacity," Proc. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, pp. 720-722, 2008.
- [4] Transmission Planning Criteria, Transmission Planning Department, EXELON, March 11, 2009.
- [5] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-2006.

BIOGRAPHY

Sung Duck Kim (Member)



Received the M.S. and Ph. D. degrees in electrical engineering for Hanyang university, Korea, in 1980 and 1988, respectively. He is a professor of electronic and control engineering, Hanbat national university, Korea. His current

research interests include power quality, power system diagnosis, and signal processing.