송전선 감지 체계를 위한 효율적인 전력 공급 장치

임천용, 문건우
한국과학기술원

An efficient power supply of monitoring systems for power transmission lines

Cheon-Yong Lim and Gun-Woo Moon
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

송전선 감지 체계를 위한 효율적인 전력 공급 장치를 제안한다. 이전에는 무시하였던 2차측 부하에 의한 영향을 고려하여 에어 갭이 없는 코어를 사용할 수 있음을 확인하였고 이를 통해 훨씬 큰 전력을 추출하였다. 분석을 통해 새로운 설계 가이드 또한 제시하였다. 실험을 통해 제안한 방식의 성능을 검증하였다.

1. 서 론

송전 시스템에는 절연체 사이에서의 누설 전류, 송전선 위에 쌓인 눈의 두께, 도선의 온도 등을 감지하기 위한 센서가 요구되며, 안정적으로 센서의 전력을 공급해 주는 일이 무엇보다 중요한 요소이다. 센서는 송전탑 근처에 설치되기 때문에 기존 방식대로 전력 공급원과 연결될 수 없으며 자가 발전이 가능한 전력원이 필요하다. 또한 여러 외부 환경에 노출된 상황에서도 유비 및 보수 없이 전력을 공급할 수 있는 안정적인 전원 장치가 필요하다.

태양 전지를 이용한 전력 공급은 많이 알려져 왔다[1]. 하지만 태양 전지는 날씨에 의한 영향을 많이 받음으로써 안정적인 전력 공급이 힘들 뿐만 아니라 패널에 쌓인 눈이나 먼지 등을 청소해줘야 하는 추가적인 보수 작업이 요구 되므로 적절하지 않다. 다른 방법으로는 전류가 흐르는 도선 주위에 형성되는 자기장으로부터 전력을 추출하는 것이다. 이는 도선에 코어를 걸어 트랜스포머를 형성하고 1차측 (송전선) 으로부터 2차측 (센서 구동 전원부) 으로 전력을 수송함으로써 전력을 공급하는 방식이다. 이 경우, 외부 환경에 의한 영향으로부터 강인할 뿐만 아니라 추가 보수가 필요 없게 되어 큰 장점을 갖는다.

이 방법의 가장 주요한 특징은 송전선에 흐르는 전류가 넓은 범위에 걸쳐 변한다는 점이다. 송전선에 흐르는 전류에 의해 자기장이 형성되며, 결국 전력 추출에도 밀접한 영향을 미치기 때문에 넓은 전류 범위에 대해 안정적인 출력전압을 내는 것이 무엇보다 중요한 요소이다. 기존 논문[2]에서는 넓은 전류 범위에 대해서 코어의 포화를 방지하기 위해 에어 갭을 포함한 코어를 설계하였다. 분석 과정에서, 센서를 구동하기 위해 2차측에서 소비되는 전력이 수 와트 미만으로써 1차측에 흐르는 수백 암페어의 송전 전류에 비해 매우 적기 때문에 2차측을 무부하 조건으로 가정하여 분석하였다. 하지만 턴 비를 고려하게 되면 2차측 전류는 턴 비만큼 곱해진 값으로 1차측과 비교되기 때문에 무시할 수 없는 수준이게 되고, 반드시 2차측 전류까지 고려하여 분석해야 한다. 또한, 에어 갭이 있는 코어를 사용하였을 경우에는 추출할 수 있는 전력량이 급격히 적어지는 문제가 있다. 본 논문에서는 2차측 부하에 의한 영향을 고려하여 보다 정확한 분석을 진행하였다. 새로운 설계 가이드를 제시하였으며 이를 통해 훨씬 큰 전력을 추출할 수 있었다.

2. 설계 원리

2.1 이론적인 분석

그림 1 은 송전선에서 센서 구동용 전력을 추출하는 전력 공급 장치의 구조를 나타낸다. $I_{pri}(t)$, L_m, n 은 각각 송전선에 흐르는 전류, 전력 추출을 위해 사용되는 코어에 의한 자화 인덕턴스, 코어에 감겨져 있는 2차측 권선 수를 의미한다. 송전선에 코어를 달고, 코어에 2차측 권선을 감은 뒤에 정류단과 dc/dc 전원단을 거쳐서 배터리를 충전하는 구조이다. 최종적으로는 배터리에서 센서 전력을 공급하여 준다.

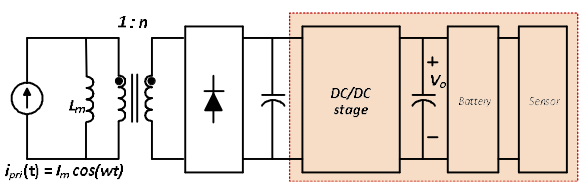

그림 1. 트랜스포머 이용한 전력 추출 회로 개략도

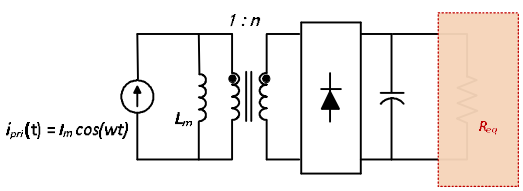

그림 2. 등가 저항 통한 전력 추출 회로 개략도

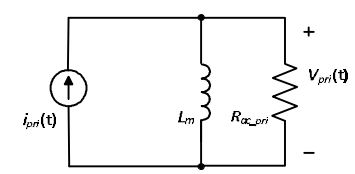

그림 3. 기본파 성분 근사법 통한 AC 등가 회로도

그림 1 에서 출력 부하에 해당하는 붉은색 영역은 등가 저항 R_{eq} 으로 표현될 수 있으며 그림 2와 같이 그려진다. 이 때, 1차측에서 2차측으로 넘어가는 전류는 기본파 성분의 교류

전류이기 때문에 정류단의 구형파 입력 전압으로부터 기본파 성분만 전력 전달에 기여한다고 가정하는 '기본파 성분 근사법'을 적용할 수 있으며 직류 성분의 출력 전압과 출력 전류로부터 기본파 성분만으로 그림 3 와 같이 AC 등가 회로도를 얻을 수 있다. 1차측으로 투영된 AC 등가 저항 R_{ac_pri} 은 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$R_{ac_pri} = \frac{8}{n^2\pi^2} R_{eq} \quad (1)$$

그림 3 으로부터 효과적으로 전력을 추출할 수 있는 두 가지 설계 조건을 알 수 있으며 첫 번째 조건은 R_{ac_pri} 의 저항 성분이 L_m 의 임피던스보다 훨씬 작아야 한다는 임피던스 비교 조건이다. 1차측 권선은 송전선으로써 권선 수가 한 턴밖에 되지 않으며, 코어의 크기는 제한적이기 때문에 코어의 투자율을 최대한 키우더라도 L_m 은 작은 값을 갖게 된다. 결국 V_{pri} 또한 매우 작게 되고, 충분한 전력을 얻기 위해서는 i_{pri} 의 상당부분이 R_{ac_pri} 로 흘러야 됨을 알 수 있다. 따라서 아래와 같은 관계를 도출할 수 있으며,

$$sL_m \geq 5R_{ac_pri} \quad (2)$$

식 (1) 을 사용하여 정리하면 아래와 같다.

$$L_m \geq \frac{20}{f_L n^2 \pi^3} R_{eq} \quad (3)$$

두 번째 조건은 최대 자속 밀도가 포화 자속 밀도보다 낮아야 한다는 코어 포화 방지 조건으로써, 아래와 같이 정리된다.

$$B_{sat} \geq B_{\max} = \frac{1}{2A_e} V_{pri} \cdot \frac{1}{2f_L} = \frac{1}{A_e} L_m \cdot i_{Lm,\max} \quad (4)$$

식 (4) 으로부터 코어의 포화를 방지하기 위해서는 I_{pri} 가 아니라 I_{Lm} 을 기준으로 설계해야 함을 알 수 있다. 이는 2차측 전류에 의해 유도되는 자속은 1차측 전류에 의한 자속과 반대 방향으로 형성되기 때문에 1차측 전류가 커질지라도 2차측 전류와 상쇄됨으로 인해 포화 문제가 발생하지 않기 때문이다. 따라서, I_{pri} 의 최대값을 기준으로 코어의 포화를 방지하기 위해 에어 갭을 넣어줬던 기존 논문과는 달리, 2차측 부하에 의한 영향을 고려함으로써 새로운 포화 조건을 얻을 수 있고 결국 에어 갭이 없는 코어를 활용하여 전력 추출량을 늘릴 수 있다.

2.2 DC/DC 전원단 적용시 고려사항

그림 1 와 같은 구조에서 dc/dc 단으로써 Buck 컨버터가 사용되었을 경우 R_{eq}, V_{pri}, V_o 은 다음과 같이 얻어진다.

$$R_{eq_buck} = R_o \frac{1}{D^2} \quad (5)$$

$$V_{pri_buck} = I_{pri}^{rms} \frac{8}{n^2\pi^2} R_{eq} \quad (6)$$

$$V_o = I_{pri}^{rms} \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{nD} R_o \quad (7)$$

D 은 Buck 컨버터의 시비율이다. 식 (7) 으로부터 일반적인 buck 컨버터와 달리 V_o 가 D 와 반비례 하는 것을 확인할 수 있다. Buck 컨버터에 대해서 앞서 소개한 설계 조건 식 (3) 와 (4) 을 적용하면 아래와 같이 다시 정리될 수 있다.

$$nD \geq \sqrt{\frac{20R_o}{f_L \cdot \pi^3} \frac{1}{L_m}} \quad (8)$$

$$nD \geq \frac{V_o}{4f_L A_e} \frac{1}{B_{sat}} \quad (9)$$

A_e 는 코어의 유효 단면적이다. 식 (7) 로부터 I_{pri} 와 D 를 제외한 다른 변수들은 값이 변하지 않는다고 하였을 때, 일정한 V_o 을 얻기 위해서는 I_{pri} 와 D 가 비례하는 관계임을 알 수 있다. 따라서 식 (8) 와 (9) 로부터, D 가 최소가 되는 최소 I_{pri} 에서 설계의 최악조건이 되고 이 때를 기준으로 설계해야 함을 알 수 있다.

3. 실험결과

1차측 전류 변동폭이 20-100A, 출력 전압이 5V 인 프로토타입 에서 실효성을 검증하였다. 기존 방식에서는, 최대 전류인 100A 를 기준으로 코어의 포화를 방지하기 위해 에어 갭을 적용하였으며, 제안된 방식에서는 에어 갭 없는 코어를 사용할 수 있었다. 실험에 사용된 L_m 와 n 값은 표 1 와 같다.

그림 4 은 1차측 전류에 따른 최대 추출 전력을 나타낸다. 제안 된 방식을 통해 추출 전력이 전 조건에 대해 향상됨을 확인할 수 있다.

목록	기존 방식	제안된 방식
L_m	1.9 μH	14 μH
n	2500	360

표 1. 사용된 값

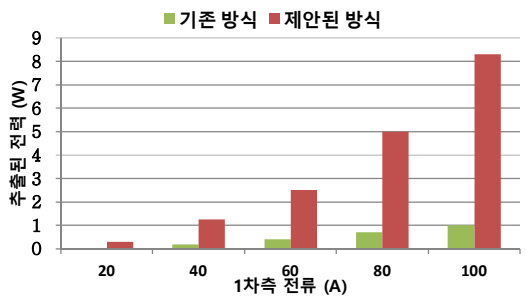

그림 4 기존 방식과 제안된 방식의 추출된 전력량 비교

4. 결 론

본 논문에서는 2차측 부하에 의한 영향을 고려하여 보다 정확한 분석을 진행하였다. 새로운 설계 가이드를 제시하였으며 이를 통해 훨씬 큰 전력을 추출할 수 있었다.

본 논문은 2016년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 10067374).

참 고 문 헌

[1] K. Kobayashi, H. Matsuo, and Y. Sekine, "Novel solar-cell power sup- ply system using a multiple-input DC-DC converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 1, pp. 281–286, Dec. 2006.

[2] D. Lin, W. Caisheng, L. Xianzhi, Y. Lijun, M. Yan, and S. Caixin, "A novel power supply of online monitoring systems for power transmission lines," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 8, pp. 2889–2895, Aug. 2010.