

국내외 PV PCS 기술현황

최 주엽¹⁾, 유 권종²⁾, 정 영석³⁾, 소 정훈⁴⁾, 최 익⁵⁾

Recent PV PCS Technology

Ju-Yeop Choi, Gwon-Jong You, Young-Seok Jeong, Jeong-Hoon So, Ick Choy

Key words : Photovoltaic(태양광), PCS(전력변환기), Anti-islanding(단독운전방자), Monitoring(모니터링)

Abstract : This paper proposes an inverter for the grid-connected photovoltaic system based on the transformer-less inverter. This system consists of a high frequency converter bridge, high frequency transformer, diode bridge rectifiers, a DC filter, a low frequency inverter bridge, and an AC filter. The high frequency converter bridge switching at 20kHz is used to generate bipolar PWM pulse, and the high frequency transformer raise its voltage twice, which is subsequently rectified by diode bridge rectifiers to result in a full-wave rectified sine wave. Finally, it is unfolded by a low frequency inverter bridge to result in a 60Hz sine wave power output. Even though the high frequency link system needs more power semiconductors, a reduced size, light weight, and saved parts cost make this system more comparative than the other systems due to elimination of 60Hz transformer.

1. 태양광발전용 PCS 기술개발 동향의 연구배경 및 중요성

가. 기술개발의 중요성(필요성)

1) 기술의 개요

일반적인 주택용 태양광발전시스템의 구성은 주택의 지붕에 태양전지 모듈을 직렬 연결하여 인버터의 입력전압에 맞추어서 발전전력을 결정한다. 태양전지어레이의 병렬접속 수에 맞추어 직류배전반이 결정되고 이것을 경유하여 인버터에 직류전력이 공급된다. 인버터는 직류전력을 교류전력으로 변환하지만 계통과 동기운전을 하면서 고조파 전류가 적은 정현파 전류를 부하기기 및 계통에 공급한다. 이때 인버터는 태양전지어레이의 출력이 최대전력에서 발전할 수 있도록 최대전력추종제어 (MPPT: Maximum Peak Power Tracking) 기능을 갖고 있을 필요성이 있다. 또한 부하기기의 가동률이 낮은 경우, 인버터는 잉여전력을 계통에 역조류시켜 전력을 상용계통에 공급하게 된다.

최근 외국에서는 인버터의 기능을 다양화함으로써 부가가치를 높여 시스템 cost-down에 기여할 수 있도록 자립운전(정

전시 태양광발전으로 전력공급가능)기능, 비상전원 및 부하평준화시스템, 전력품질 향상을 위한 액티브 필터기능 등을 내장시켜 나가고 있어, 국내 기술과 상당한 기술격차를 나타내고 있다.

태양광발전용 인버터는 시스템 특유의 제어기능을 보유하기 때문에 "Power Conditioner System : PCS (이하 PCS라 칭함)"라고 불려지고 있으며, 태양광발전용 PCS와 범용 인버터와 커다란 차이점은

- ① 시시각각 변화하는 태양전지의 최적 동작점을 언제나 추적하여 최대발전량을 얻을 수 있도록 운전하기 때문에 최대전력점 추적기능이 내장되어 있어야 하며
- ② 계통에 대하여 역을 1의 운전이 요구되기 때문에 제어용 기준신호는 계통에서 받아야 하고
- ③ 계통사고로부터 PCS를 보호하며 시스템의 고장으로부터 계통을 보호하여야 하기 때문에 각종 보호기능을 내장하여야 하는 등과 같은 차이점을 갖고 있다.

일반적으로 인버터는 입력전원이나 출

1), 4), 5) 광운대학교 전자정보공과대학
2), 3) 에너지기술연구원

력제어방식에 따라 4종류로 분류된다. PCS는 태양전지를 전압원으로 간주하여 전압형이 주류이며, 계통연계는 전압형 전류제어방식으로서 동작한다. 또한, 최근 외국의 인버터에는 정전시에 태양전지의 발전전력을 이용하여 직접 주택부하에 사용가능한 자립운전기능이 부가되어 있는 경우가 많다. 자립운전의 경우에는 전압형 전압제어방식으로 동작한다.

태양전지를 전류원으로 간주한 전류형 인버터는 전력리플을 흡수하기 위한 직렬 리액터가 필요하며, 이 리액터가 커지기 되기 때문에 현재까지 시작품 제작 예는 발표되고 있지만, 상품으로 시판되고 있는 제품은 없는 것으로 알려지고 있다.

즉 계통연계형 태양광발전시스템의 기초기술이 확립된 지금은 주변장치에 대한 가일층 코스트저감을 시도함과 동시에 더욱이 시스템으로서의 이용가치를 향상시키는 방향으로 기술개발의 중점을 맞추어 추진하는 것이 향후의 실용화보급을 촉진하는데 중요하다고 사료된다.

2) 기술개발의 중요성

□ 기술적 측면

최근 기후변화협약과 같은 지구환경문제가 대두됨에 따라 환경오염이 적은 대체에너지의 대표적인 시스템으로서 태양광발전시스템의 보급이 미국, 일본 및 유럽 등의 선진국을 중심으로 가속화되고 있다. 우리나라 역시 태양광발전시스템의 확대보급을 가속화 시킴으로서 자립을 시장을 형성할 수 있게 하기 위해서는 구성요소의 원가절감이나 다양한 기능을 부가하여 부가가치를 확립할 수 있는 연구가 필요하며, 기존의 집중 배치형은 대량생산 체제에 문제가 있어 제품의 저가화에 장애 요인으로 작용하고 있다. 따라서 본 과제에서는 태양광발전용 기능의 다기능화와 집중형에서 분산형으로 용량을 일정 용량으로 규격화(1kW, 3kW) 함으로서 대량생산이 가능토록 하여 저가화에 기여함과 동시에, 기능의 다양화 및 용량을 규격화함으로써 대량생산 체제확립과 향후 개발제품의 신뢰성 및 성능 인증시험을 대비한 연구를 추진하고자 한다.

□ 경제적 측면

- 일반적으로 태양광발전시스템의 용량은 String 단위 혹은 Unit 단위로 증감하기 때문에 String 용량과 Unit 용량에 적당한 인버터를 규격화 혹은 표준화한다면 시스템 용량의 증감에 유연하게 대응할 수가 있으며 양산화에 의한 원가절감도 기대할 수 있다. 향후 보급 가능한 시스템의 용량이 비교적 소용용량의 설치가 증가할 것으로 사료되기 때문에 용량을 규격화 및 표준화함으로써 경제적으로도 충분한 가치가 있다고 할 수 있

다.

- 또한 「에너지기술개발 10개년 계획」의 대체에너지 개발목표인 2006년까지 총에너지 수요의 2%를 대체에너지로 공급하기 위해서는, 국내의 기술수준이 실용화단계에 이르렀고, 중점지원분야로 선정된 태양광발전의 상용화가 선행되어야 한다.

□ 사회문화적 측면

- 생활수준의 향상에 따른 삶의 질 향상에 따른 욕구 충족과 기존발전방식에 대한 집단거부 반응을 설득하기 위해서는, 환경친화적인 태양광발전기술의 상징적 활용과 보급촉진이 필요하며,

- 특히 공해발생이 없는 태양광발전기술은 최근의 기후변화협약에 따른 온실가스 배출규제의 대처방안이며, 실질적인 CO₂ 저감효과를 기대할 수 있다.

3) 개발기술의 당면과제 및 애로기술

- 태양광발전용 PCS개발을 위한 체계적인 지원체제 구축

- 전력용 반도체스위치 등 주요핵심 부품 상당량이 수입에 의존하고 있기 때문에 저가화에 장애요인

- PCS의 경우 소형화, 고효율화 뿐만 아니라 규격화와 양산기술확립에 의한 저가화를 시도하여야 하나 국내개발 및 생산경험이 미흡함.

- 계통연계형 태양광발전시스템을 실용화하기 위해서는 remote monitoring에 필요한 연구비의 투자가 요구되며, 보급확대를 위해서는 미국, 일본등 선진국에서 이미 시행하고 있는 보급정책과 지원제도 및 관련법규의 정비가 선행되어야 함.

나. 국내·외 관련 기술의 현황

1) 국내의 경우

국내의 기술개발은 1987년 12월에 제정된 대체에너지기술개발촉진법을 근거로 1988년부터 대체에너지기술개발 기본계획이 수립됨으로서 본격적인 기술개발이 추진되었다. 태양광발전기술은 개발 필요성과 중요도에 따라 범국가적 연구사업으로 수행되었으며, 1단계 ('89 ~ '91) 기간동안 결정질 실리콘 태양전지 및 주변장치의 국산화와 이용기술을 개발하고, 2단계 ('92 ~ '96) 기간은 저가·고효율 박막 태양전지의 기초기술 및 주변장치의 저가화와 신뢰도를 확립함으로써 실용화 기반을 구축하며, 3단계 ('97 ~ 2001) 기간은 박막 태양전지의 상품화와 응용 제품 개발에 의한 태양전지의 보급확대 및 태양광발전시스템의 실용화를

목표를 설정하고 있다.

하지만 이러한 목표가 있음에도 불구하고 태양광발전용 인버터는 태양광발전시스템의 이용기술 개발의 일부분으로 소홀하게 취급되는 등 연구개발이 추진이 지연되어 왔다. 하지만, 태양광발전용 인버터는 태양광발전시스템의 구성요소 중에서 가장 핵심부분으로 심층적인 연구개발이 지속적으로 추진되어야 한다고 사료된다. 지금까지의 연구개발 사례로는 한국에너지기술연구원, LG산전(주) 중앙연구소에서 1992년에 계통연계형 인버터를 8비트 DSP를 활용하여 개발하였으나, 상용화 연구가 추진되어지지 않아 연구결과가 사멸되어 버렸다. 1994년부터 1995년까지 2년간의 연구가 삼성전자(주)와 예기연, 건국대 등과 공동으로 32비트 DSP를 활용하여 시제품을 개발하였으나 그 역시 연구결과가 사멸되어지고 있는 상황이다.

현재의 국내기술 현황은 기본적인 기술은 확립되어 있으나 신뢰성, 효율, 저가화 등은 외국과 많은 기술격차가 존재하며, 전력계통보호 및 전력품질개선에 대한 기능은 전혀 고려되지 못하고 있다. 따라서 태양광발전기술의 활성화를 위해서는, 지금까지의 개발성과를 정밀분석하고, 기술내용에 따라 기초연구, 개발, 실용화의 단계별로 구분하여 상용화가 가능한 과제를 중점 지원하여야 하며, 제품의 성능향상과 시스템의 신뢰도 확립을 위한 실증 시험 및 시장개척을 위한 이용기술연구를 수행하여 보급촉진과 연계되어야 한다고 여겨진다.

2) 국외의 경우

태양광발전분야의 기술 선진국인 미국, 일본 및 유럽의 개발정책은, 2000년대 초까지 기존의 발전방식과 경쟁이 가능한 수준의 발전단가를 가격목표로 설정하고, 저가효율의 태양전지 및 주변장치의 저가화와 이용기술 개발에 주력하고 있다. 특히, 태양광발전용 인버터는 3kW급 계통연계형 인버터의 개발이 완료되어 제품으로서 시판되고 있으나, 발전전력을 필요로 하는 부하용량과 태양전지어레이 설치 공간의 확보 등의 제약 조건으로 정격에서 운전되지 못하고 정격미만에서 운전되거나 용량을 애매하게 초과되는 경우, 비효율적인 운전방식등이 확대보급에 장애요인으로 작용하고 있다고 인식되며, 기존의 3kW급 용량에 1kW급의 String 인버터와 중용량의 시스템용으로 10kW급의 Unit형 인버터에 대하여 기술적인 검토를 통하여 제품개발에 주력하고 있다.

외국에서 개발된 인버터의

성능을 정량적으로 기술수준을 평가하는 것은 각각의 인버터가 각국의 환경에 따라 독자적으로 개발되었기 때문에 단순 비교할 수는 없지만, 여기서는 주택용 소규모 태양광

발전용 PCS에 대하여 비교 검토하는 것으로 한다. 일본과 미국의 제품은 인버터의 단위용량이 3kW ~ 5kW급으로 일반가정에서 평균적으로 일년간 사용하는 전력량과 태양광발전이 일년간 발전되는 발전량을 계산하여 용량을 3kW급으로 결정하였다. 하지만 유럽의 경우는 부하용량 및 설치공간에 대하여 유연하게 대응하기 위하여 단위용량을 1kW급 정도로 개발되고 있다

태양광발전시스템의 확대보급을 위해서는 시스템의 가격을 낮추는 것이 중요하며, 시스템의 저가화를 위해서는 태양전지의 고효율화에 의한 저가화 제조기술과 인버터의 저가화기술 개발로 분류할 수 있으며, 태양전지의 저가화는 상당기간 어려울 것으로 예상하고 있어 인버터의 저가화에 의한 전체 시스템 저가화에 대한 기술개발에 주력을 하고 있다. 그래서 위에서 언급한 인버터의 절연방식중 상용주파수 절연변압기 사용방식은 인버터의 가격중에서 절연변압기가 커다란 위치를 차지하고 있으며, 절연변압기에 의해 인버터 전체의 크기, 전력손실의 저감에 한계가 있기 때문에 고주파 절연방식의 인버터가 외국에서는 개발되고 있다. 또한 최근에는 절연변압기를 생략하고도 충분히 직류유출을 방지할 수 있는 기술을 연구개발하여 시스템 저가화에 기여하고자 노력하고 있다.

한편 수 10kW급의 중규모, 수 100kW급의 대규모시스템에 사용되는 인버터의 기술개발도 중용량급 PV시스템 적용기술과 함께 연구개발이 병행되고 있으나, 여기서도 가격의 저가화가 커다란 과제이다. 그래서 개발된 주택용 인버터의 회로 Unit, 또는 그 이상의 용량의 표준 Unit를 복수대 조합하여 이것을 1대의 대표 Unit 또는 중앙의 제어부로부터 일괄하여 제어하는 Master Slave 방식을 이용하는 기술이 연구개발되고 있다.

2. 세부기술사항의 검토분석

가) 계통연계형 인버터의 기본구성 및 동작

계통연계형 인버터는 역변환장치로서 스위칭소자는 최근 IGBT (Insulation Gate Bipolar Transistor)를 주로 사용하며 스위칭주파수는 가칭주파수 이상의 약 20kHz의 동작주파수로 스위칭시키고 있다. 인버터는 기본적으로 변환부의 IGBT(Q1 ~ Q4) 및 윗터(리액터 L, 콘덴서 C), 절연변압기 등으로 구성되고 있다.

인버터는 직류전력을 교류전력으로 변환하는 것으로 나타낸 정현파 변조 PWM제어에 의해 IGBT의 ON, OFF를 반복하여 출력전압 e_i 를 만들어 내고 있다. 오차신호는 전류를 정현

파로 하기 위하여 전류제어방식을 사용하고 있다. 이 때문에 이와 같은 인버터방식을 전압형 전류제어방식이라고 한다. IGBT의 ON, OFF제어로 얻어진 출력파형 e_i 는 상용전원의 정현파 파형과는 다르기 때문에 필터(L,C)에 의해 정현파화 시킨다. e_c 는 필터를 통하여 정현파화된 필터의 출력전압파형이다. 출력전류는 인버터의 전류제어를 하고 있기 때문에 i_c 와 같이 고조파가 제거되어 깨끗한 정현파로 출력된다.

나) 인버터 주요기술 및 요구되는 기능

인버터에는 태양전지의 발전전력을 최대한으로 활용할 것과 가정에서 사용하기 때문에 환경유지, 안전성 확보 및 전력회사의 상용계통에 연계운전하기 때문에 전력회사와 협의하여 양질의 전력과 안전성을 고려하여 설치하여야 한다. 계통연계에 있어서 요구되는 사항 중에서 중요한 항목을 정리하여 기술하며, 이러한 기술이 국내의 Power Conditioner System에서 일부는 그 기능을 보유하고 있으나, 상당부분의 기능이 아직은 확립되어 있지 못하고 있으며, 이에 대한 성능시험방법도 확립되어 있지 않다.

1.1 최대전력추종제어기능(MPPT)

태양전지는 일사량 및 온도에 의해 출력특성이 변화하여 최대전력을 얻을 수 있는 최대전력점도 바뀌게 된다. 그렇기 때문에 최대전력점에서 인버터가 운전할 수 있도록 최대전력점을 언제나 감시하여 응답제어를 하도록 최대전력 추종제어 기능이 요구된다. 최대출력제어기법은 많은 제어기법이 보고되고 있지만, 제어기법에 따라서는 최적동작범위가 존재한다는 논문이 발표되고 있어 외국의 제품에서는 동작범위에 따라 동작하는 2가지 제어기법을 적용하는 기법을 채용하고 있다. 또한 이러한 제어기법의 성능평가를 위한 최대출력제어 효율 측정법에 대해서도 검토되고 있다.

1.2 고효율제어

IGBT는 스위칭 동작 주파수를 고주파 스위칭을 하게 되면 스위칭 손실이 증가하게 된다. 스위칭 손실을 최대한 억제하기 위한 회로방식 및 제어가 필요함과 동시에 제어 회로 등의 고정손실도 최대한으로 억제시킬 필요가 요구된다. 또, 야간등과 같이 태양광 발전시스템이 발전할 수 없을 경우, 즉 무부하 상태의 손실을 최소화하는 것도 총발전량 증가에 필요한 기술분야로서 충분히 검토되

어야할 기술이다.

1.3 소음 저감

주택내 혹은 그의 실내에 설치를 고려하면 인버터에서의 소음을 최소화시킬 필요가 있다. 이 때문에 동작주파수를 약 20kHz로 가청주파수 이상으로 함과 동시에 냉각팬의 사용을 억제하고 자연냉각방식을 채용하는 것도 소음저감을 위하여 중요한 포인트 중의 하나이다.

1.4 직류분 제어기능

향후 저가형으로 각광을 받을 transformerless 방식 인버터에서는 인버터의 이상동작에 의해 교류출력에 직류성분이 혼입하여 계통에 유입되면 주상변압기의 편자현상 등에 의해 계통이나 다른 수용가 설비에 고장을 유발할 수 있는 영향을 미칠 염려가 있다.

국내에서는 이에 대한 규제규격이 없지만 외국의 경우는

“인버터의 정격교류출력전류의 1%이하, 검출시간 0.5초 이내”로 엄격히 규제하고 있다.

계통연계형의 인버터는 상기의 규제기준 이하로 직류성분의 유출을 억제할 수 있는 제어기능이 요구된다.

1.5 직류지락검출기능

transformerless 방식의 인버터에서는 직류, 교류간이 절연되어 있지 않기 때문에 직류회로에 지락이 발생하면 계통측에서 인버터를 통하여 지락전류가 흐르게 된다. 지락전류 검출에는 ZCT(영상변류기)를 사용하고 있기 때문에 직류지락전류가 흐르게 되면 ZCT의 자기포화를 일으켜 지락검출불능 상태가 될 가능성이 있다. 누전차단기에서의 검출불능의 가능성을 고려하여 인버터내부에 직류지락검출회로를 추가하여 검출한 경우는 인버터를 정지함과 동시에 계통으로부터 분리되도록 시퀀서를 설계하여 설치할 필요가 있다.

1.6 고조파 억제

인버터로부터 역조류된 전류에 포함된 왜율이 크면 계통 및 부하설비에 손실증대와 기기손상 등의 영향을 줄 우려가 있기 때문에 일반적으로 아래의 기준치를 적용하여 개발하는 것이 요구되고 있다(10).

·중합 전류왜율 5% 이하 ·각차 전류왜율 3% 이하

고조파를 억제하기 위하여 인버터는 일반적으로 전류파형을 양질의 정현파로 만들기 위한 제어를 하게되며, 부가적으로 필터를 설치하게 된다. 최근에는 고조파 저감을 위한 보상방법에 대해서도 많은 기법들이 보고되고 있어 보고된 기법들을 태양광발전용 계통 연계형 인버터에 적용하는 기술에 대해서도 검토되어야한다고 사료되며 외국에서는 적용 사례가 보고되고 있다.

1.7 고주파 억제

인버터는 전력용 반도체 스위칭소자 IGBT를 고속으로 ON, OFF동작을 반복하기 때문에 고주파 노이즈를 발생하고 있다. 고주파의 노이즈는 TV, 라디오 등의 기기에 불필요한 잡음과 화면의 찌그러짐, 기기의 오동작 등에 영향을 주게 된다. 국내에서는 이에 대한 구체적인 규제기준이 없으나, 외국에서는 계통연계 태양광발전용 소형(10KVA이하) 인버터의 경우 잡음단자전압을 아래의 값으로서 규제하고 있다.

0.5MHz ~ 30MHz이하: 73dB (μV) 이하

0.15MHz ~ 0.5MHz이하: 79dB (μV) 이하

국내에서도 태양광발전용 인버터를 개발할 경우 상기의 기준치를 적용할 필요가 있으며, 이를 적용함으로써 다른 기기에 미치는 영향을 최소화할 수 있다고 사료된다.

1.8 계통연계 보호기능

인버터의 고장 또는 계통사고시에 사고의 제거, 사고범위의 극소화를 위하여 인버터를 정지하고 계통과 분리할 필요가 있다. 일반적으로 아래의 4가지 요소를 검출하여야 한다.

과전압계전기 (OVR : Over Voltage Relay)

부족전압계전기 (UVR : Under Voltage Relay)

주파수상승계전기 (OFR : Over Frequency Relay)

주파수저하계전기 (UFR : Under Frequency Relay)

1.9 단독운전방지기능

계통사고시에 인버터가 부하용량과 평형을 유지하여 이상현상을 검출하지 못하고

운전을 계속하는 상태를 단독운전이라고 한다. 단독운전이 발생하면 계통이 상위에서 차단되어 있어도 저압측으로부터 전압이 유기기 때문에 안전면에서 문제가 발생한다. 현재까지 개발된 단독운전방지기능 검출기법으로서는 수동적 방식과 능동적 방식으로 크게 분류할 수가 있으며, 외국에서는 수동적 방식과 능동적방식의 각각 하나의 방식 이상을 조합하여 검출기법으로 사용하고 있다.

지금까지 외국에서 개발된 회로방식은 다음과 같다.

1. 수동적 방법

1) 전압 주파수 감시: 선로전압과 주파수 이상 감시

2) 전압위상 급변검출 : 선로전압의 위상급변 검출

3) 제 3차 고조파 급변 검출 : 전류제어형 인버터와 조합하여 주상변압기에서 발생하는 제3차 고조파 전압성분의 급변 검출

4) 주파수 변화율 검출: 선로주파수의 급변 검출

2. 능동적 방법

1) 주파수 Shift 방식: 내부발전기 주파수에 미소 바이어스를 주어 선로주파수나 전압위상 등의 급변 검출

2) 출력전력 변동방식: 출력의 유효전력 또는 무효전력을 지속적으로 미소변동시켜 선로주파수나 전압위상 등의 급변 검출

3) 부하변동 방식: 외부에서 부하를 지속적으로 미소변동시켜 선로측 임피던스의 급변 검출

3. 결론

이상으로 태양광발전용 인버터에 대한 선진외국의 기술개발 추진 추이를 바탕으로 태양광발전시스템 및 인버터가 요구되는 기능성능에 대하여 정리하였다. 하지만, 국내의 기술개발수준은 시장의 불투명으로 기업의 적극적인 참여 부족으로 아직 초보 단계에 있어 선진국과의 기술격차는 심각하다고 사료된다. 따라서, 국내에서도 미국, 일본 등의 선진국과 같이 태양광발전시스템의 보급촉진을 위해서는 태양전지뿐만 아니라, 주변장치의 하나이며, 시스템의 핵심부분이라 할 수 있는 인버터의 저가화를 비롯하여 소형-경량화, 기능의 다기능화 등에 관하여 충분한 체계적인 연구가 선행되어야 하며, 태양광발전시스템의 잠재능력 및 부가가치를 최대화함으로써 지구환경문제와 더불어 미래 에너지원의 다원화 차원에서 확대보급에 기여할 것으로 사료된다.

References

- [1] A. Cocconi, S. Cuk, and R.D. Middlebrook, "High-Frequency Isolated 4kW Photovoltaic Inverter for utility Interface", PCI/MOTOR-CON Proceedings, 1983, pp. 39-59.
- [2] T. Takebayashi, H. Nakata, M. Eguchi, and H. Kodama, "New Current Feed back Control Method for Solar Energy Inverter using Digital Signal Processor", PCC-Nagaoka, 1997, pp. 687-690.
- [3] R.L.Steigerwald, "Application of Power Transistors to Residential and Intermediate Rating Photovoltaic Array Power Conditioners", IEEE Trans. Ind. Appl.,vol. IA-19, NO. 2, March/April 1983, pp. 254-267.
- [4] R. Katan, V. G. Agelidis, C. V. Nayar, "P Spice Modelling of Photovoltaic Arrays", International Journal Electrical Engineering Education, pp.319-332, October 1995.115-149
- [2] Duque EPN, van Dam CP, Hughes SC. Navier-Stokes simulations of the NREL Combined Experiment phase II rotor, a collaboration. AIAA Paper 99-0037,1999.